

Experimentální studium krátkodobého tečení polypropylenu při ohybu

Bc. Marek Marák

Diplomová práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek MARÁK**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Experimentální studium krátkodobého tečení PP
v ohybu**

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte literární řešení na dané téma
- 2) Zkonstruujte přípravek pro přesná měření krátkodobého modulu tečení plastů v ohybu
- 3) Experimentálně stanovte závislost modulů tečení PP vzorků na čase
- 4) Dosažené výsledky vyhodnoťte z hlediska praktických aplikací

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2010**

Ve Zlíně dne 21. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá krátkodobým tečením polymerních materiálů vlivem mechanického zatížení. Je sledován průběh modulu tečení 2 typů polypropylenu při zatěžování tříbodovým a čtyřbodovým ohybem v čase. Experiment najde uplatnění při dimenzování a navrhování svařovaných polypropylenových konstrukcí ČOV, jímek, bazénů apod.

Klíčová slova:

Creep, Polypropylen, 3 bodový ohyb, 4 bodový ohyb

ABSTRACT

Thesis is considering about short-term creep of polymer materials supported by mechanical load. We observe creep modulus by the time submitted 3 point and 4 point bending for two materials. Experiment will used for dimensioning and projecting of welded polymer containers, swimming pools, sewerage plants and other constructions.

Keywords

Creep, Polypropylen, 3 point bend, 4 point bend

Příjmení a jméno: Marek Marák

Obor: Konstrukce technologických zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze

kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 18.5.2010

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 POLYPROPYLEN	13
1.1 VÝROBA POLYPROPYLENU.....	13
1.2 FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	14
1.3 ZPRACOVÁNÍ A UŽITÍ POLYPROPYLENU	15
1.4 MODIFIKACE POLYPROPYLENU	15
1.4.1 PP-H polypropylen homopolymer	15
1.4.2 PP-B polypropylen blokový kopolymer	16
1.4.3 PP-TALK polypropylen plněný mastkem.....	16
1.4.4 PP-FOAM lehčený polypropylen.....	16
1.4.5 PP-MRB polypropylen s retardéry hoření.....	16
2 CREEP	17
2.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA CREEPU	17
2.1.1 Tečení z hlediska teorie molekulárních přeskoků	17
2.2 VISKÓZNÍ CREEP.....	19
2.3 VLIV TEPLoty SKELNÉHO PŘECHODU NA CREEP	20
2.4 VLIV MOLEKULOVÉ HMOTNOSTI A KRYSTALINITY NA CREEP	20
2.5 VLIV STÁRNUTÍ POLYMERŮ NA CREEP	21
2.6 DIFŮZNÍ CREEP V KRYSTALICKÝCH MATERIÁLECH.....	21
2.7 NORMY.....	22
2.7.1 ČSN ISO 899-1 Plasty-Stanovení křipového chování	23
2.7.2 ČSN EN 1778 Charakteristické hodnoty pro svařované termoplastické konstrukce-Stanovení dovoleného namáhání a moduly pro návrh termoplastových součástí.	31
3 TEORIE OHYBU NOSNÍKŮ	34
3.1 NAPĚTÍ, DEFORMACE.....	34
3.2 METODA ŘEZU	35
3.3 TŘÍBODOVÝ OHYB.....	36
3.4 ČTYŘBODOVÝ OHYB.....	37
4 STABILITA DESEK A VÁLCOVÝCH SKOŘEPIN	38
4.1 JEDNOOSE TLAČENÁ DESKA S ROVNÝMI BOČNÍMI OPKRAJI	38
4.2 VÁLCOVÁ SKOŘEPINA S VNĚJŠÍM PŘETLAKEM	38
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
5 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ	41

5.1	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA	41
5.2	MĚŘÍCÍ APARATURA	41
5.2.1	Měřicí přípravek.....	43
5.2.2	Mechanické zatížení.....	43
5.2.3	Měření deformace	43
5.3	ZÁZNAM MĚŘENÝCH DAT	44
6	MĚŘENÍ DEFORMACE.....	46
6.1	TŘÍBODOVÝ OHYB.....	47
6.2	ČTYŘBODOVÝ OHYB.....	49
7	VÝSLEDKY MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ.....	52
7.1	TŘÍBODOVÝ OHYB.....	54
7.1.1	Blokový polypropylen PP-B.....	54
7.1.2	Polypropylen homopolymer PP-H	57
7.2	ČTYŘBODOVÝ OHYB.....	60
7.2.1	Blokový polypropylen PP-B.....	60
7.2.2	Polypropylen homopolymer PP-H	63
7.3	DISKUZE VÝSLEDKŮ	67
8	APLIKACE VÝSLEDKŮ V PRAXI	70
8.1	GEOMETRIE MODELU KONSTRUKCE.....	70
8.2	PROVOZNÍ PODMÍNKY:	71
8.3	MATERIÁLOVÉ PARAMETRY KONSTRUKCE	71
8.4	VÝPOČET	72
8.4.1	Kontrola na pevnost.....	72
8.4.2	Kontrola na stabilitu.....	76
	ZÁVĚR	79
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	80
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	82
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM TABULEK	86

ÚVOD

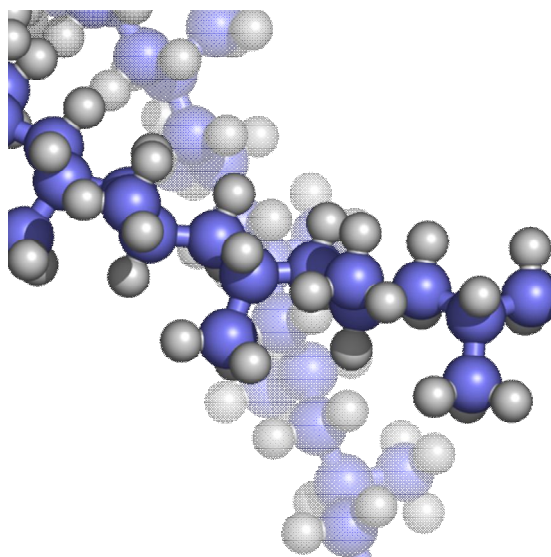
Diplomová práce je zaměřena na problematiku tečení polymerů. Podmínky experimentu vychází z praktických aplikací. Creep je zaznamenáván pro krátkodobé intervaly mechanického zatížení. Výsledné hodnoty modulu tečení polypropylenu budou využity při dimenzování a kontrole svařovaných konstrukcí z PP desek. Kontrolu bude prováděna z hlediska pevnosti, únosnosti a stability konstrukce.

Nosníky obdelníkového průřezu jsou namáhány třibodovým a čtyřbodovým ohybem. Průběh modulu tečení je zjišťován na základě změny deformace vzorku v čase. Experiment je prováděn pro různá ohybová napětí, jež docilují nastavením vzdáleností podpor a velikosti zatížení. V poslední části práce je uveden praktický případ kontroly pevnosti, únosnosti a stability ČOV pro různé případy zatížení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYPROPYLEN

Polypropylen je polymerní termoplastický materiál, patřící do skupiny polyolefinů. Tyto plasty jsou v dnešní době jedny z nejužívanějších především v potravinářském, textilním průmyslu nebo zdravotnictví. Je odolný vůči organickým rozpouštědlům, alkoholům, olejům. Má velmi dobré mechanické vlastnosti a chemickou odolnost.



Obr. č.: 1 3D model molekuly Polypropylenu

Tento semikrystalický polymer byl objeven v roce 1954 na milánské univerzitě Natta. Byl polymerován použitím speciálních stereospecifických katalyzátorů. V té době se jednalo o mimořádný lineární polymer. Záhy v roce 1957 zahájila společnost Montecatini průmyslovou výrobu tohoto materiálu a dále jej produkovaly také firmy Shell, Herkules, Spencer a jiné.

1.1 Výroba polypropylenu

Výchozí surovinou pro výrobu je nenasycený olefinický propylen. Propylen se získává z propanu jež je součástí zemního plynu a rafinačním plynu při zpracování ropy. Propylen se převádí pomocí tepelného krakování při teplotě 750°C. Výchozí propylen získáváme především jako vedlejší produkt výroby ethylenu pyrolitickým štěpením primárního benzínu.

Stěžejním problémem je dosažení čistoty propylenu. Mezi hlavní katalytické jedy počítáme kyslík, oxid uhličitý a oxid uhelnatý dále sloučeniny síry a vodu. Surový propylen obsahuje 2-3% uhlovodíků C₂, 3-4% C₄ a 35-53% propanu. Cílem je propylen o čistotě 99,5-99,7%.

Toho dosáhneme dvoustupňovou destilací. Polymerace propylenu probíhá v polymerátoru při nízkém tlaku, mírně zvýšené teplotě 50-100°C a za působení stereospecifických katalyzátorů v reakčním prostředí vhodných rozpouštědel. Vzniklý polymer je směsí izotaktického a ataktického polymeru. Polypropylen se vysráží v podobě 20-30% tuhé látky jež se ze směsi odstředí. Rozhodujícím faktorem pro správnou polymeraci je čistota vstupních surovin, teplota polymerace, koncentrace výchozího propylenu a polymerační doba.

1.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti

Fyzikální vlastnosti jsou spjaty především s podílem izotaktického polypropylenu a jeho molekulovou hmotností. Celková krystalinika PP je závislá především na krystalinitě izotaktické části, jež bývá zpravidla kolem 60%. Hustota polypropylenu je 0,9g/cm³. Je bezbarvý nezávadný polymer bez zápachu. Vyznačuje se vysokou tvrdostí, pevností a tepelnou odolností. Krátkodobě snese i teplotu až 140°C, přičemž se při dlouhodobějším tepelném zatížení musí stabilizovat proti oxidaci. Ve srovnání s polyethylenem má vyšší pevnost v tlaku a vyšší tvrdost ovšem nižší vrubovou houževnatost, jež se výrazně mění s teplotou. Při 10°C je materiál křehký, zahřátím na 40°C se rázová houževnatost prudce zvýší. Dále se vyznačuje velmi nízkou propustností pro plyny a páry, je asi o 25-50% nižší než u vysokotlakého PE. Této vlastnosti se hojně využívá při výrobě obalů potravin. Bod měknutí nastává kolem 165°C, čehož se využívá při výrobě předmětů vystavených vysokým teplotám do 135°C. Dlouhodobé vystavení teplotě přes 200°C je důsledkem tepelného rozkladu.

Polypropylen má dobrou chemickou odolnost vůči organickým sloučeninám. Při teplotě kolem 90°C je rozpustný v chlorovaných a aromatických uhlovodících. Odolává kyselině sírové a chlorovodíkové až do 100°C. Stabilizátory se zvyšuje odolnost vůči působení kyslíku a ozonu. Nevýhodou tohoto materiálu je vysoká křehkost pod teplotou 0°C.

V praxi se hojně využívá polypropylenu vyztuženého skelnými a minerálními vlákny. Těchto materiálů se využívá především v automobilovém průmyslu. Přídavek vláken zvyšuje teplotní odolnost, tvarovou a rozměrovou stálost, roste hodnota modulu pružnosti a rázová houževnatost. Při 40% obsahu skelných vláken roste modul pružnosti až pětinašobně.

Velký význam mají také zpěňovatelné modifikace PP, jež se využívají k výrobě strukturálně lehčených dílců. zpravidla vstřikováním.

1.3 Zpracování a užití polypropylenu

Polypropylen má velmi široké spektrum použití, jak v technice tak i ve spotřebním zboží. Velmi dobrá zatékavost materiál předurčuje k výrobě tvarově složitých a komplikovaných dílců především pro automobilový průmysl. Z výhodou se využívá dobrých elektroizolačních vlastností. Tepelné odolnosti se využívá k použití ve zdravotnictví. S výhodou lze výrobky sterilizovat teplotou aniž by se překročil bod měknutí materiálu a tím se výrobek znehodnotil. Jsou to například injekční stříkačky, hadičky, součásti přístrojů atd.

Jedná se o výborně tvařitelný materiál. Vyrábí se mnoho druhů modifikovaných pro konkrétní zpracovatelské aplikace. Vstřikováním se vyrábí výrobky s dobrou rozměrovou stálostí a lesklým povrchem. Teplota komory vstřikovacího stroje se pohybuje kolem 200-270°C. Forma se temperuje na 30-70°C.

Technologií vytlačování se vyrábějí trubky, desky, folie a jiné profily. Vhodná délka šneků se pohybuje od 20D do 25D. K výrobě folií lze použít jak širokoštěrbínové hlavy tak i hlavy kruhové s následným rozfukováním rukávu. Desky lze využívat k vakuovému tvarování. Desky i trubky lze s výhodou spojovat svařováním PP drátem za použití horkovzdušné pistole o teplotě vzduchu 200-220°C. Folie lze dobře svařovat sálavým teplem i tepelným impulsem. Potíže polypropylen vykazuje při lepení, obdobně jako polyethylen.

Folie z tohoto materiálu lze také potiskovat, čemuž předchází úprava plamenem nebo tichým výbojem v elektrostatickém poli ke zvýšení přilnavosti. Další možností je použití ataktického polypropylenu, kde není nutná jakákoliv úprava povrchu.

Technologií zvláknování se vyrábějí velmi kvalitní technická vlákna.

1.4 Modifikace polypropylenu

1.4.1 PP-H polypropylen homopolymer

Tento materiál je zdravotně nezávadný a může přijít do styku s poživatinami. Vyrábí se v různých barevných provedeních, případně i s UV stabilizátorem, jež má ale menší význam, jelikož se používá výhradně pro interiérové aplikace. Ve srovnání s polyolefinickými materiály má větší pevnost, tuhost, tvrdost, ale nižší rázovou odolnost při teplotách pod bodem mrazu. Naopak vykazuje vyšší křehkost a to zejména při teplotách pod bodem mrazu a nižší odolnost vůči povětrnostním vlivům. Z desek lze vyrábět spíše pravoúhlé nezkrúžované

nádrže, různé samonosné výrobky či díly technologických zařízení, jejichž teplota použití neklesne pod 10 °C. Chemická odolnost je velmi dobrá. Při navrhování a konstrukci výrobků je nutné vycházet ze základních charakteristik chování materiálů při zatížení a dlouhodobém užívání.

Desky se dají mechanicky obrábět na zařízeních podobných pro opracování dřeva za použití nástrojů na plasty. Spojují se horkým vzduchem za přídavku materiálu nebo na tupo.

1.4.2 PP-B polypropylen blokový kopolymer

Tento materiál má dobré fyzikálně-mechanické vlastnosti při zachování rázových pevností při teplotách pod bodem mrazu. To umožňuje využití desek pro exteriérové aplikace za použití vhodných UV stabilizátorů, například jímky, čističky apod. Materiál je zdravotně nezávadný, lze jej použít pro styk s potravinami, pitnou vodou a také použití v zemědělství, výrobu rodinných bazénů atd. Při navrhování a konstrukci je nutné vycházet ze základních creepových charakteristik chování materiálů při zatížení a dlouhodobém používání.

1.4.3 PP-TALK polypropylen plněný mastkem

Tyto desky se vyrábí smícháním mastku a PP-B. Výsledkem je materiál s nárůstem jeho mechanických vlastností-pevnost, modul pružnosti atd., ale současně došlo k poklesu rázové houževnatosti. Desky je možno použít pro venkovní aplikace, kde jsou požadovány vyšší pevnosti. Konstrukční díly z tohoto materiálu mohou být samonosné.

1.4.4 PP-FOAM lehčený polypropylen

Je vyráběn ze stejného materiálu jako PP-H. Lehčení je uskutečňováno nadouvadly, jež vytvoří pravidelně lehčenou strukturu po celé tloušťce desky.

1.4.5 PP-MRB polypropylen s retardéry hoření

Přítomnost retardéru nemá vliv na mechanické vlastnosti ani svařitelnost materiálu, užívá se tam, kde se uvažuje vyšší požární nebezpečnost.

2 CREEP

Definice: Každá pevná látka se může chovat jako kapalina pro nekonečné časové úseky.

Creepová deformace je pomalá deformace probíhající v čase

$\varepsilon = f(\sigma, t, T)$ - je funkcí napětí, času a teploty. Obecně hovoříme o vysokoteplotních a nízkoteplotních vlastnostech. U polymerních materiálů se creepová deformace projevuje především nad teplotou skelného přechodu T_g .

Při výběru materiálu pro vysokoteplotní aplikace je nutné uvažovat creep. Bohužel použití polymerních materiálů, především termoplastů při zvýšených teplotách je omezeno jejich malou odolností vůči zvýšeným teplotám.

2.1 Fyzikální podstata creepu

Obecně můžeme říci, že mechanismy tečení jsou pro každou skupinu materiálů rozdílné. Creep daného materiálu se liší také v závislosti na podmínkách zatěžování teplotou a mechanickým napětím. Základem tečení jakožto deformace v čase je pohyb atomů a molekul v pevné fázi vyvolaný tepelnou aktivací. Creepové chování pevných látek řadíme do difúzních dějů.

2.1.1 Tečení z hlediska teorie molekulárních přeskoků

Viskózní a elastické chování polymerů lze za předpokladu prostorové makromolekulární sítě podložit teorií molekulárních přeskoků. Taková síť se skládá z částečně pohyblivých segmentů, je propojena vzájemně zaklesnutými smyčkami a obsahuje krystalické oblasti. Působením tepelného pohybu a vnějšího zatížení dochází k přeskokům výhradně ve směru vnějšího namáhání. Vnější síly se přenáší molekulárními vazebnými silami z částice na částici a tak mění rozdělení potenciálu vzniklého vzájemným působením všech hlavních a vedlejších valenčních sil v okolí dané částice. Tím se mění pravděpodobnost přeskoků a střední doba ustálení uvažovaných částic v možných polohách. Důležitá je přítomnost molekulárních dutin, v tuhém polymeru nelze vypočítat jednotlivá silová molekulová pole. Proto zavádíme střední molekulové vzdálenosti.

K přeskokům dochází především v amorfních oblastech, u krystalických struktur se přeskoky uskutečňují jen na rozhraních nebo v místech poruchy. Pravděpodobnost seskoků je vyšší na teplotou skelného přechodu. Podstatný vliv má přítomnost molekulárních dutin, jež vznikají vlivem vyšší tepelné roztažnosti na teplotou T_g . Při ustavení rovnováhy kinetiky viskoelastického chování dochází ke dvěma následujícím pochodům :

- Elastický (vratný) tok

Přeskoky molekul vedou k uspořádání se sníženou entropií, tedy k výhradnímu obsazování poloh ve směru toku bez změny vnitřní energie. Bez působení vnějšího napětí dochází k obsazování těchto poloh méně často.

Nedojde-li ke změně potenciální křivky, dochází k častějšímu obsazování volných poloh s vyšší energií. Vzrůst na vyšší potenciál je podmíněn přítomností uzlových bodů.

- Viskózní (nevratný) tok

Přeskoky molekul způsobují zánik původních uzlových bodů a molekuly se odpoutávají a přemísťují do zcela jiného prostředí. Celková průměrná potenciální energie se nemění, vytvářejí se nové potenciálové vally. Energie potřebná k přemístění částic přechází po přeskoku v neuspořádaný tepelný pohyb. Jedná se o nevratné (viskózní) přeskoky.

Veškeré tokové děje jakožto nevratné deformace lze vznikající i při prostém protažení nebo stlačování, je v základním principu smykový pohyb jednotlivých vrstev klouzajících se vzájemně po sobě. Směr pohybu (toku) je kolmý ke gradientu rychlosti jednotlivých vrstev. Vnitřní tření jsou molekulární přeskoky. Mezi molekulami nevznikají žádné třecí síly. Teorie přeskoků nahrazuje hydrodynamickou teorii kontinua statistickými úvahami.

Při plastické deformaci, tedy za současného působení tepelných nárazů a vnějšího zatížení platí, že deformace viskoelastické látky probíhá při minimálním počtu celkových přeskoků. Tyto přeskoky jsou rozděleny do celé oblasti, kde působí vnější zatížení. Jejich četnost a rozdělení se odvíjí od rozložení napětí. Smyková napětí podporují přeskoky a viskózní tok.

2.2 Viskózní creep

Smyková viskozita η_τ kapalin je odpor vůči smykovému toku. Je definována jako podíl působícího smykového napětí a výsledné rychlosti smykové deformace

$$\eta_\tau = \frac{\tau}{\dot{\epsilon}},$$

kde η_τ je smyková viskozita. Podobně je definována elongační (tahová) viskozita.

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}}$$

Pro ideálně viskosní látku, která je nestlačitelná platí $\eta = 3 \cdot \eta_\tau$. Tedy konstantní hodnota η odpovídá chování pístu zatíženého silou.

Chování některých pevných materiálů můžeme přirovnat k vysoce viskózním kapalinám. Většinou se jedná o amorfni látky, např. sklo, ABS, PC, SAN a další. Amorfni materiály vznikají z kapalného stavu o velmi vysoké viskozitě, kdy jejím vlivem a vlivem nedostatku času nedojde k oddálení atomů do podoby krystalické mřížky. Podobně lze zabránit krystalizaci původně krystalického polymeru prudkým ochlazením jeho taveniny, kdy polymer nestihne vytvořit krystalickou strukturu. Jestliže na těleso z amorfniho materiálu působíme vnějším zatížením, dochází k vzájemnému posouvání molekul-difúzi, což je základním principem deformace creepu. Tyto pohyby jsou výraznější s rostoucí teplotou. S rostoucí teplotou dochází ke kmitání atomů kolem svých rovnovážných poloh a tím roste pravděpodobnost pohybu jednotlivých molekul. Tento mechanismus je nazýván tepelná aktivace. Matematicky se rychlost tepelně aktivovaného procesu popisuje Arheniův vztah

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \frac{Q}{RT},$$

$\dot{\epsilon}$ je rychlost deformace, Q je aktivační energie, je mírou potenciálové bariéry, kterou musí překonat atom nebo molekula, aby změnil(a) svoji polohu. Hodnota Q vychází z konkrétního materiálu, ale i mechanismu tečení jež je dán teplotou a působícím napětím.

Kombinací 2 předchozích rovnic dostaneme vztah, který dává do relace rychlost s napětím a teplotou.

$$\dot{\epsilon} = A_1 \cdot \sigma \cdot \frac{Q}{RT},$$

Citace:

Koeficient A_1 závisí především na materiálu, ale stejně jako v případě Q se může měnit v případě, že dojde ke změně fyzikální podstaty mechanismu tečení vlivem změny podmínek zatěžování (napětí, teplota). Lineární závislost mezi rychlostí deformace a napětím je hlavním rysem creepu způsobeným viskózním tečením.

2.3 Vliv teploty skelného přechodu na creep

U většiny polymerních materiálů je vliv tečení pod teplotou T_g zanedbatelný. Rozhodující vliv tečení nastává překročením této teploty. T_g se u polymerů pohybuje od -100°C do 200°C , tzn. v okolí pokojové teploty. Viskózní creep je výrazný především u krystalických polymerů, např. polyethylenu, zvláště kolem teploty tání. Sekundární vazby vodíkový můstek a Van der Waalsovy síly drží jednotlivé molekuly pohromadě. Nejsilnější jsou pod teplotou T_g a postupně klesají ohřevem. Dochází k viskóznímu tečení vzájemným klouzáním molekulových řetězců. Klouzáni znesnadňuje rozvětvení případně zesíťení a délka molekul, naopak krátké a lineární řetězce tečení podléhají nejsnadněji. Při teplotách mírně nad T_g , kdy se materiál nachází ve strukturním kožovitém stavu působí jako překážka proti tečení vzájemné zapletení řetězců a míra jejich větvení. Z dalších jevů je významná například tvarová paměť materiálu. Po odlehčení se těleso snaží částečně vrátit do původního stavu uvolněním zkroucených částí řetězců, jež jsou mezi jednotlivými zapleteninami. Tyto segmenty fungují jako pružiny jež vrací tělesu původní tvar, tímto částečně odbourávají počátek tečení.

Teplotu T_g pro daný materiál roste se stupněm zesíťení. Epoxidové pryskyřice a termosety mají hodnotu T_g mnohem vyšší než termoplastické materiály, tzn. velmi snadno odolávají tečení.

2.4 Vliv molekulové hmotnosti a krystalinity na creep

Dále má podstatný vliv molekulová hmotnost, potažmo délka molekulových řetězců jež ovlivňuje hodnotu T_g . Výsledkem je se zvyšující se molekulovou hmotností klesající schopnost creepu.

Poslední z vlivů na creep je krystalinita plastu; krystalický příp. částečně krystalický polymer je odolnější vůči creepu ve srovnání s plastem s amorfni strukturou.

Podstatné snížení náchylnosti polymeru vůči creepu se docílí vytvořením kompozitu, t.j. plněním plastové matrice skleněným nebo křemeným prachem (plněný polypropylen se používá na řadu součástek v automobilu).

Nejodolnějším materiálem vůči creepu je kompozit plastová matrice + dlouhá vlákna (GFRP, CFRP), v tomto případě zatížení přenáší vlákna, která jsou velice pevná a zcela odolná vůči creepu.

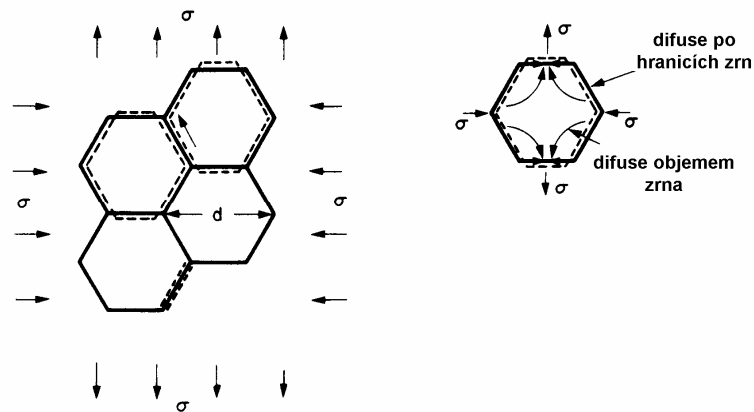
2.5 Vliv stárnutí polymerů na creep

Ke stárnutí polymerních materiálů dochází snížením jejich teploty. Dochází ke snížení pohyblivosti molekul a tím se prodlužují relaxační doby na mnohem delší časové intervaly. Ke strukturálním změnám shlukování, uspořádání apod. dochází pomaleji. Důsledek stárnutí je mnohem nižší pohyblivost molekul i při zachování konstantní teploty a tím zabránění nebo snížení creepových deformací.

2.6 Difúzní creep v krystalických materiálech

Konstrukční materiály s krystalickou strukturou jsou kovy, jejich slitiny a keramika.

V případě keramiky může struktura obsahovat vedle krystalické fáze i fázi skelnou (amorfní) jako je tomu např. u porcelánu. Rozdíl mezi krystalem a sklem je pouze v uspořádání atomů na větší vzdálenost. Základní stavební jednotkou krystalických látek je atom, u polymerů je základní jednotkou molekula. Podstatou tečení v krystalech je tedy difúze atomů.



Obr. č.: 2 Difúze atomů v krystalu

Trvalá plastická deformace je výsledkem difúzního a dislokačního tečení. K difúznímu tečení dochází při působení malého napětí a vysoké teploty. Tahové napětí způsobuje vznik vakancí naopak napětí tlakové umožňuje vznik intersticiálních atomů. Koncentrace těchto poruch se vyrovnávají difúzí a tím vzniká tečení materiálu.

Mezní stav tečení může způsobit až porušení materiálu v podobě trhlin vysokou plastickou deformací. Tento jev bude převládat na hranicích jednotlivých zrn.

Při návrhu součástí zařízení, kde se uvažuje tečení materiálu je projektovaná doba životnosti 20let. Laboratorní zkoušení materiálů se provádí v časových intervalech 1000hodin (41dní) ,případně 10 000hodin (14 měsíců). Pro stanovení vlastností materiálu při velice malých rychlostech deformace při provozní teplotě lze buď odhadnout přiblížení vhodné závislosti deformace na napětí směrem k nízkým teplotám. Mnohem úspěšnější přístup je vycházet z krátkodobých zkoušek při zvýšené teplotě a předikovat chování v dlouhodobějším měřítku za provozních teplot.

2.7 Normy

Stanovování příslušných creepových vlastností se řídí normami, jež stanovují přesnou metodu, postupy a podmínky jež je nutné dodržet z hlediska použitelnosti výsledků pro konkrétní praktické aplikace.

2.7.1 ČSN ISO 899-1 Plasty-Stanovení kríповého chování

Část 1: Creep v tahu

Prodloužení v čase t $(\Delta L)_t = L_t - L_0$

Relativní prodloužení v čase t $\varepsilon_t = (\Delta L)_t / L_0$

Creepový modul v tahu $E_t = \frac{\sigma}{\varepsilon_t} = \frac{F \cdot L_0}{A \cdot (\Delta L)_t}$

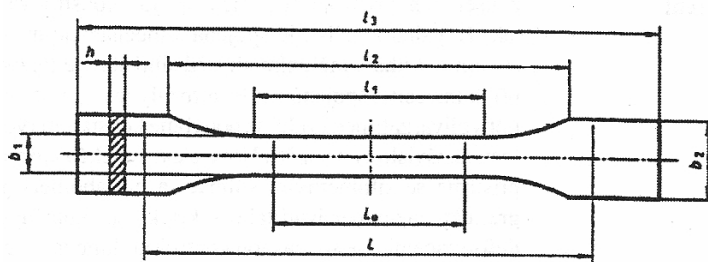
Izochronní křivka napětí-poměrné prodloužení vyjadřuje závislost napětí na poměrném prodloužení při creepu v tahu v daném čase po aplikaci zkušebního zatížení.

Čas do porušení-doba mezi počátkem plného zatížení tělesa a jeho porušením

Mez creepové pevnosti-počáteční napětí, které právě způsobí prasknutí, nebo vyvine pře-depsané poměrné prodloužení při creepu v tahu v daném čase t při dané teplotě a vlhkosti

Zotavení z creepu je pokles napětí v kterémkoli daném čase po úplném odstranění zatížení zkušebního tělesa, vyjádřený v procentech napětí vloženého bezprostředně před odstraněním zatížení.

Zkušební tělesa jsou definována normou ČSN EN ISO 527 pro stanovení tahových vlastností plastů.



Obr. č.: 3 Tvar zkušebního tělíska

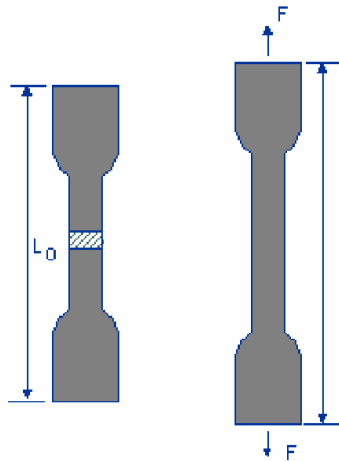
Zkušební zařízení

Přípravek k uchycení zkušební tělesa zajišťuje, aby byl směr působení zatížení co nejshodnější s podélnou osou tělesa. Tak je zajištěno, že zkušební těleso podléhá jednoduchému napětí a napětí v zatížené oblasti zkušební tělesa jsou rovnoměrně rozptýlena po průřezu zkušební tělesa kolmo na směr napětí.

System zatěžování musí zajistit plynulé zatěžování, při němž nesmí dojít k přetížení a aby bylo v rozmezí $\pm 1\%$ požadované hodnoty. Při creepové zkoušce prováděné do porušení zkušební tělesa se musí zajistit, aby se na přilehlý zatěžovací systém nepřenášely žádné rázové vlny, vznikající v okamžiku porušení. Zatěžovací systém musí dovolit rychlé, plynulé a reprodukovatelné zatěžování.

Měření prodloužení dotykovým nebo bezdotykovým zařízením schopným měřit prodloužení bez vlivu na mechanické, fyzikální a jiné vlastnosti zkušební tělesa. Při bezdotykovém (optickém) měření deformace musí být optická osa měř. zařízení kolmo k podélné ose tělesa. Pro stanovení zvětšení délky tělesa se musí použít extenzometr zaznamenávající nárůst vzdáleností mezi čelistmi. Přesnost měřícího zařízení musí být $\pm 1\text{ mm}$.

Při creepové zkoušce prováděné do porušení zk. tělesa se doporučuje, aby prodloužení bylo měřeno bezdotykovým optickým systémem pracujícím na principu katetometru. Doporučuje se automatická indikace doby do porušení. Měřená délka musí být označena na zkušebním tělese buď přiložením kovových svorek s vyrytými značkami. Elektricky odolné měřáky deformace jsou vhodné pouze v případě hodnocení materiálu, který dovoluje uchycení měřáků deformace ke vzorku pomocí lepidla a pouze v případě, kdy kvalita spoje je konstantní během celé zkoušky.



Obr. č.: 4 Tahová zkouška na trhacím stroji

Měření tloušťky a šířky zkušebního tělesa pomocí mikrometru s přesností na 0,01mm.

Postup zkoušky

Kondicionování a prostředí pro zkoušení

Zkušební tělesa se kondicionují podle instrukcí v normě na zkoušený materiál. Pokud taková informace ohledně kondicionování není k dispozici, použije se nejvhodnější prostředí pro kondicionování předepsané v ISO 291, nedohodnou-li se smluvní strany jinak.

Creepové chování bude ovlivněno nejen tepelnou historií zkušebního tělesa, ale rovněž teplotou a pokud je použita) vlhkostí, užitými při kondicionování. Není-li zkušební těleso v rovnováze pokud jde o vlhkost, dojde k následujícímu ovlivnění creepu: zkušební těleso příliš suché podléhá další deformaci způsobené pohlčováním během zkoušky a zkušební těleso příliš vlhké se v důsledku ztráty vody smršťuje. Doporučuje se, aby se při kondicionování použila doba $\geq t_{90}$.

Zkouší se ve stejném prostředí, které bylo použito ke kondicionování, pokud není dohodnuto jinak mezi smluvními stranami, např. u zkoušek při zvýšené nebo nízké teplotě. Teplota během zkoušky musí být v tolerancích $\pm 2^\circ\text{C}$.

Výběr hodnoty napětí

Vhodná hodnota napětí se zvolí podle předpokládaného použití zkoušeného materiálu a pomocí rovnice $\sigma = F/A$ se zvolí použité zatížení zkušební tělesa. Pokud je místo počátečního napětí předepsána počáteční deformace, hodnota napětí se může vypočítat s použitím Youngova modulu pružnosti materiálu dle ISO 527-1

Postup zatěžování

Pokud je nutné zkušební těleso před zvýšením zatížení na zkušební hodnotu předběžně zatížit, například za účelem odstranění vůle poháněcího segmentu, musí se zajistit, aby toto předběžné zatížení neovlivnilo výsledky zkoušky. Nesmí se předběžně zatěžovat dokud teplota a vlhkost zkušební tělesa uchyceného v čelistech přístroje neodpovídají podmínkám zkoušky. Po nastavení předběžného zatížení se stanoví měřená délka. Předběžné zatížení se udržuje během celé zkoušky.

Zatěžování tělesa probíhá progresivně tak, aby k plnému zatížení došlo 1 až 5s po začátku zatěžování. V každé sérii zkoušení jednoho materiálu se použije stejná rychlost zatěžování. Celkové zatížení včetně předběžného se bere jako zkušební zatížení.

Časový rozvrh měření prodloužení

Časový okamžik, ve kterém je zkušební těleso plně zatíženo, se označí jako t_0 . Pokud se prodloužení nezaznamenává automaticky, musí se zvolit časy ke stanovení jednotlivých měřených hodnot podle průběhu creepové křivky zkoušeného materiálu. Je vhodné používat následující časový rozvrh měření: 1 min, 3 min, 6 min, 12 min, 30 min, 1h, 2h, 5h, 10h, 20h, 50h, 100h, 200h, 500h, 1000h atd. Měření času je nutné zajistit s přesností 0,1%

Vyjádření výsledků

Creepový modul tečení

$$E_t = \frac{\sigma}{\varepsilon_t} = \frac{F \cdot L_0}{A \cdot (\Delta L)_t} [MPa]$$

Je vyjádřen jako podíl napětí a poměrného prodloužení v každém měřeném časovém okamžiku.

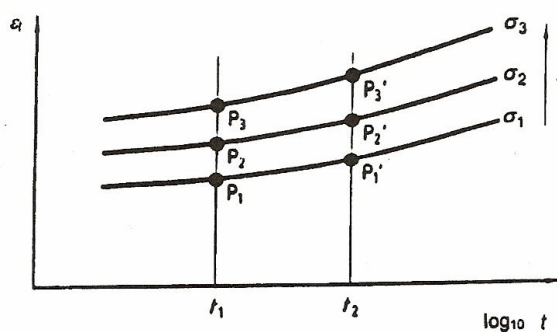
Jmenovitý creepový modul v tahu
$$E_t^* = \frac{\sigma}{\varepsilon_t^*} = \frac{F \cdot L_t^*}{A \cdot (\Delta L^*)_t} [MPa]$$

Je dán jako podíl počátečního napětí a nominálním poměrným prodloužením v tahu v každém měřeném čase.

Grafické znázornění výsledků

Creepové křivky

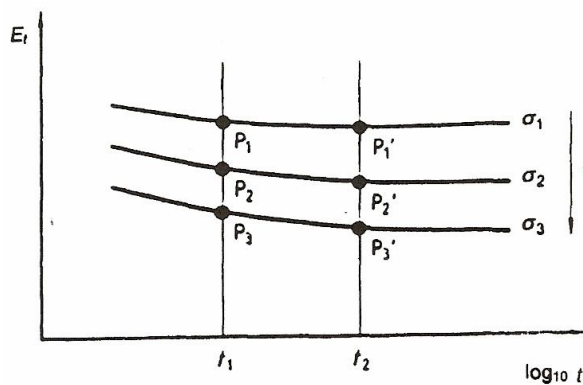
Zobrazují se křivky závislosti poměrného prodloužení v tahu na čase v logaritm. souřadnici pro různé teploty.



Obr. č.: 5 Křivky poměrného prodloužení v tahu na čase při různých teplotách

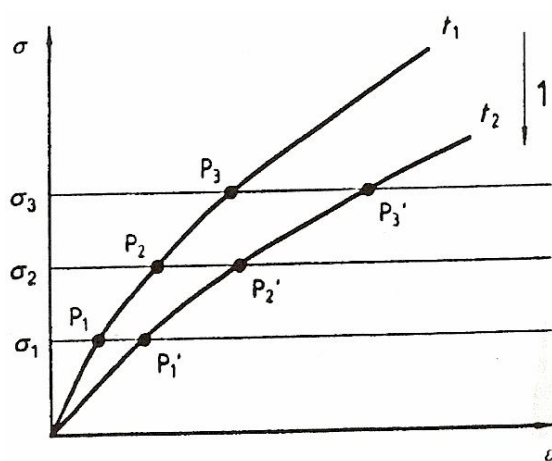
Křivky creepového modulu v tahu-čas

Pro každé původní použité napětí se vypočtený creepový modul vynese proti logaritmu času při zatížení.



Obr. č.: 6 Křivky modulu tečení v závislosti na čase

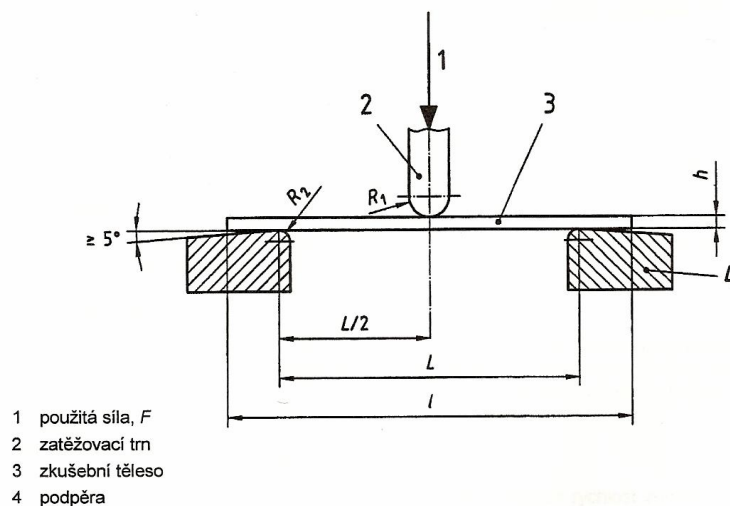
Izochronní křivka napětí-poměrné prodloužení zobrazuje na vložném zatížení v určitém časovém okamžiku po zahájení zatěžování. Vynáší se několik křivek, odpovídajících dobám zatěžování 1h, 10h, 1000h a 10000h. Protože každá creepová křivka poskytne pouze jeden bod na každé izochronní křivce, je nutné provést zkoušku nejméně při třech různých napětích. Např. k získání izochronní křivky při 10h. se z každé creepové křivky při 10h odečte hodnota poměrného prodloužení a tyto hodnoty se vynesou na osu x proti odpovídajícím hodnotám napětí na ose y.



Obr. č.: 7 *Izochronní křivka napětí-poměrné prodloužení*

Část 2: Creep v ohybu při tříbodovém zatížení

Předepisuje metodu stanovení creepu v ohybu plastů ve tvaru standardních zkušebních těles za předepsaných podmínek, jako předběžná úprava, teplota, vlhkost. Používá se pouze pro jednoduše podepřené tyče zatěžované uprostřed. Metoda je vhodná pro tuhé, polotuhé nevyztužené, plněné a vlákny vyztužené plastové materiály ve tvaru pravoúhlých tyčí tvářených nebo řezaných z desek nebo výlisků



Obr. č.: 8 Schema tříbodového ohybu

Průhyb s_t vzdálenost, o kterou se horní nebo dolní strana uprostřed zkušebního tělesa odchýlí od polohy před zatížením během zkoušky.

Poměrné prodloužení při creepu v ohybu ϵ_t je prodloužení povrchové vrstvy tělesa které je způsobeno ohybovým napětím v určitém časovém okamžiku

Creepový modul v ohybu E_t poměr ohybového napětí k poměrnému prodloužení při creepu v ohybu

Izochronní křivka napětí-poměrné prodloužení je závislost napětí na poměrném prodloužení při creepu v ohybu v daném čase po aplikaci zkušebního zatížení.

Zkušební zařízení

Je tvořeno pevným rámem osazeným pohyblivými podpěrami pro tříbodový ohyb. Jejich vzájemná vzdálenost se nastavuje pro normální materiály jako $(16+1)$ násobek výšky zkušebního tělesa, nebo na více než sedmnáctinásobek výšky tělesa nebo na pevnou vzdálenost 100mm pro tuhá, jednosměrně vlákny vyztužená zkušební tělesa. Stožan musí být ve vodorovné poloze a pod zkušebním tělesem musí být uprostřed dostatečný prostor k průhybu vlivem maximálního zatížení.

Zatěžování musí být plynulé s odchylkou od stanovené hodnoty $\pm 1\%$. Při kríповé zkoušce prováděné do porušení musí být zajištěno, aby se do zatížení nepřenášely žádné rázové vlny vznikající v okamžiku porušení. Zatěžování musí být rychlé, plynulé a reprodukovatelné.

Měření průhybu se uskutečňuje dotykovou nebo bezdotykovou (optickou) metodou. Měřící zařízení nesmí mechanicky, fyzikálně nebo jinak ovlivnit chování zatíženého tělesa. Přesnost měřícího zařízení musí být v rozsahu $\pm 0,01\%$ z celkového průhybu.

Rozměry zkušební tělesa měříme mikrometrem s možností odečtu 0,01mm. Stanovení vzdálenosti podpor pomocí posuvného měřidla s přesností 0,1% dané vzdálenosti.

Zkušební tělesa mají tvar a rozměry shodné s tělesy ke stanovení ohybových vlastností dle normy ČSN EN ISO 512.

Postup zkoušky

Kondicionování zkušebních těles se provádí stejným způsobem jako v první části normy pro creep při tahovém zatížení.

Výběr hodnoty napětí -vhodná hodnota napětí se volí podle předpokládaného použití zkoušeného materiálu a podle toho se zvolí hodnota ohybového zatížení.

Volíme napětí takové, aby průhyb nebyl v žádném okamžiku větší než 0,1vzdálenosti mezi podpěrami.

Postup zatěžování a časový rozvrh zatěžování je shodné jako v části 1

Vyjádření výsledků

Creepový modul v ohybu $E_t = \frac{F \cdot L^3}{4b \cdot h^3 \cdot s_t} [MPa]$

L-vzdálenost mezi podpěrami

b-šířka zk. tělesa

h-výška zk. tělesa

s_t-průhyb ve střední části těl.

Napětí v ohybu $\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} [MPa]$

Poměrné prodloužení v ohybu $\varepsilon_t = \frac{6s_t \cdot h}{L^2}$

Grafické znázornění výsledků provádíme stejným způsobem jako v části 1

2.7.2 ČSN EN 1778 Charakteristické hodnoty pro svařované termoplastické konstrukce-Stanovení dovoleného namáhání a moduly pro návrh termoplastových součástí.

Většina svařovaných konstrukcí je vystavena zatížení v několika směrech, proto se používají jako základ pro přípustné navrhované napětí křivky životnosti pro trubky. Tyto křivky jsou podloženy mnohaletým měřením a zkušenostmi. Křivky životnosti nelze extrapolovat pro vyšší teploty, než je uvedeno v diagramech. Pro zohlednění působení různých medií a různých teplot na různé materiály uvádí norma množství korekčních koeficientů pro jednotlivá media A_2 a svařovací faktory f_1 .

Norma plně specifikuje metodu pro stanovení charakteristických hodnot nutných pro navrhování svařovaných konstrukcí z termoplastů, např. nádrže, ČOV, kontejnery atd. Norma platí pro celou řadu plastických materiálů, např. PP, PVC, PE, PVDF.

Stanovení dovoleného napětí a modulů

Dlouhodobé hodnoty jsou základem pro statický výpočet svařovaných konstrukcí. V závislosti na povaze zatížení se rozlišují všeobecně 3 kritéria.

- 1) Napětí
- 2) Deformace (průhyb, ohyb)
- 3) Stabilita (krátkodobé, dlouhodobé boulení)

Výpočet napětí se musí provádět na základě dlouhodobého namáhání při tečení, většinou v různých směrech. Maximální celkové namáhání nesmí přesahovat přípustnou pevnost při tečení.

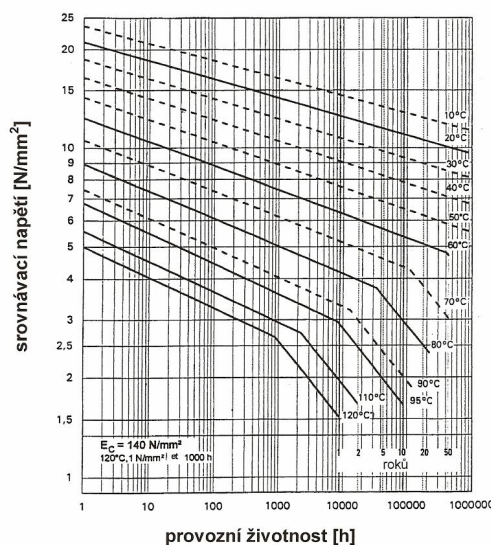
Přípustné hodnoty jsou odvozovány pomocí korekčního, svařovacího faktoru a koeficientu bezpečnosti z charakteristických hodnot materiálu. Pro deformaci a pevnost je kritický navrhovaný parametr modul tečení. Tento získáme z diagramu modulu tečení v závislosti na čase, teplotě a napětí. V případě problému se stabilitou se počítá s koeficientem bezpečnosti.

Statický výpočet podle pevnosti

Přípustné napětí vypočítáme z hodnoty pevnosti při tečení, korekčních a svařiv. faktorů a koef. bezpečnosti.

$$\sigma_d = \frac{K * f_1}{A_1 * A_{2K} * S}$$

Křivky životnosti znázorňují pevnost jako funkci času a teploty. Byly odvozeny z dlouhodobých vnitřních tlakových zkoušek na vzorcích trubek naplněných vodou a představují minimální hodnoty.

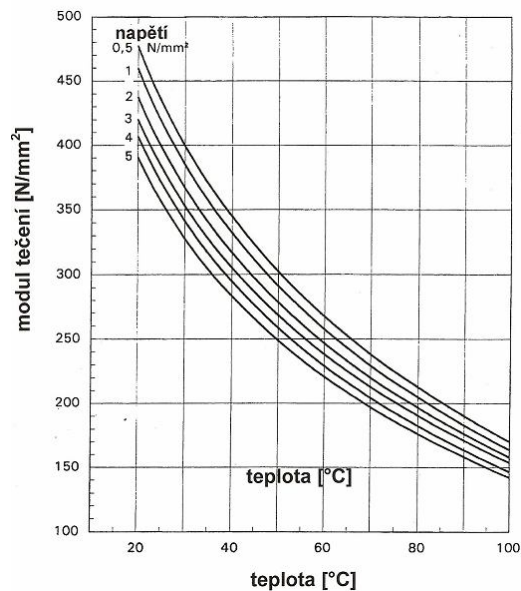


Obr. č.: 9 Křivky provozní životnosti pro trubky z PP-H

Statický výpočet podle stability a ohybu

Pro termoplasty se používá modul tečení E_t místo modulu pružnosti užívaného v teoretické mechanice. Modul tečení je závislý na čase, namáhání a teplotě. Může také záviset na mediu

(v jednotlivých případech, když jeho složky způsobují bobtnání materiálu, je nutné stanovit skutečné charakteristické hodnoty). Pro použité materiály odečteme hodnoty modulu tečení z křivek modulu tečení.



Obr. č.: 10 Modul tečení PP-H při různých napětí za 1 rok

3 TEORIE OHYBU NOSNÍKŮ

3.1 Napětí, deformace

Ohyb je druh mechanického namáhání, při němž se původně přímý prut (nosník) přetváří v plošně nebo prostorově zakřivený prut. Toto namáhání vzniká účinkem vnějšího působení sil nebo momentů, které vyvolají vnitřní účinky v podobě silové dvojice v rovině řezu kolmém k podélné ose nosníku. Element prutu má v nezátíženém stavu úhel mezi rovinami soumězných řezů $1,2$ $d\varphi$ a zakřivení podélné neutrální osy o poloměru r . Ta tvoří spolu s neutrální osou z plochu nulových ohybových napětí- neutrální plochu. Deformace elementu představuje vzájemné natočení řezů $1, 2$ o úhel $\Delta d\varphi$. Dochází ke změně zakřivení z r na

$$\rho.$$

$$\frac{r}{\rho} = 1 - \frac{\Delta d\varphi}{d\varphi}$$

Protože v podélných vláknech v neutrální ploše je nulové napětí, jejich délka se nemění, platí:

$$rd\varphi = \rho(d\varphi - \Delta d\varphi)$$

Relativní prodloužení (zkrácení podélného vlákna v místě y):

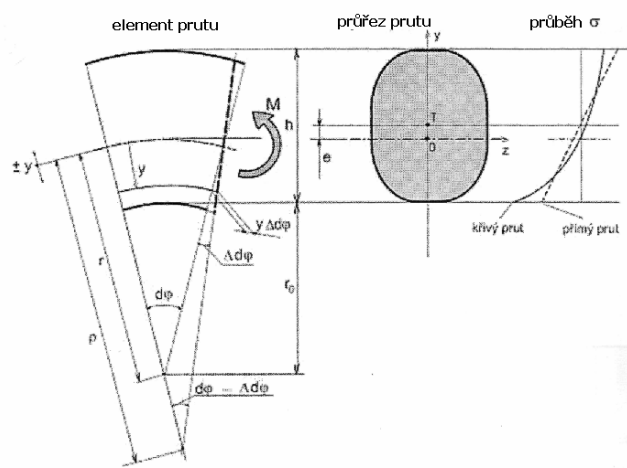
$$\varepsilon(y) = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{y\Delta d\varphi}{(r+y)d\varphi}$$

Ohybové napětí v místě y :

$$\sigma(y) = E\varepsilon(y) = \frac{Ey}{r+y} \left(1 - \frac{r}{\rho} \right)$$

Momentová podmínka rovnováhy sil v průřezu prutu je :

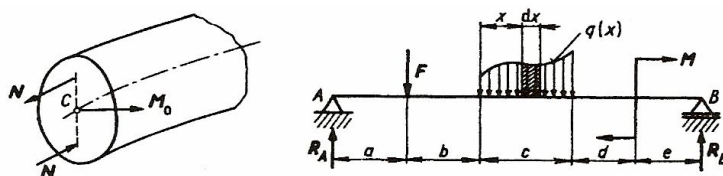
$$M = \int_S \sigma(y)y dS$$



Obr. č.: 11 Element zakřiveného prutu zatíženého ohybem

Vnější účinky mohou zajišťovat:

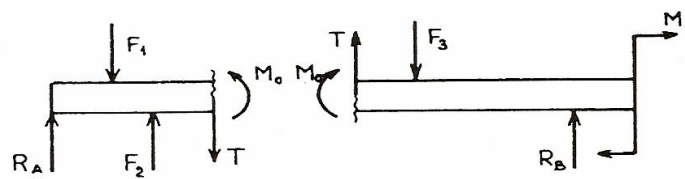
- osamělé síly F kolmé k ose prutu, jež mohou být výslednicí sil zatěžujících těleso
- spojitá zatížení Q , působící na určité vzdálenosti nosníku, v praxi například násep, vlastní váha nosníku, tlakem vody apod.
- ohybové momenty M_0 tvořeny silovými dvojicemi v rovinách kolmých k podélné ose řezu



Obr. č.: 12 Zobrazení jednotlivých typů vnějších zatížení prutu

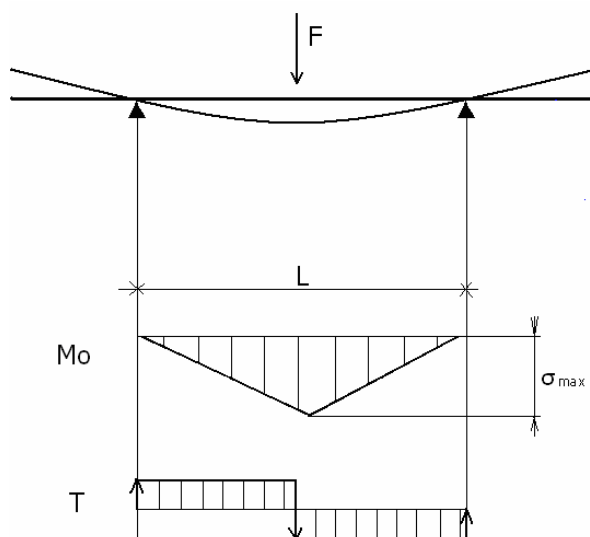
3.2 Metoda řezu

Ke zjišťování deformací a pevnosti ve všech místech nosníku užíváme metodu myšleného řezu. V místě, kde zjišťujeme vnitřní silové účinky, myšleně vedeme řez. Oddělenou část nosníku nahradíme odpovídajícími silovými účinky, tak aby byla šetřená část v rovnováze. Ve svislém směru brání pohybu příčná síla T , rotaci rozříznuté části zabraňuje ohybový moment M_0 .



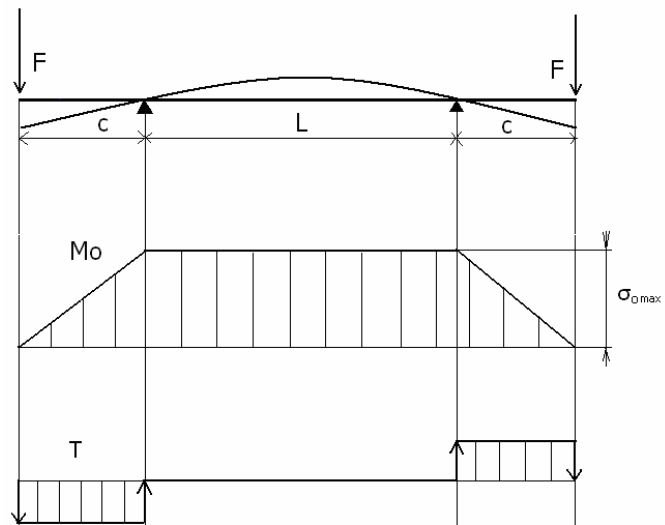
Obr. č.: 13 Schema principu metody řezu

3.3 Tříbodový ohyb



Obr. č.: 14: Průběh ohyb. momentu a příčných sil tříbod. ohybu

3.4 Čtyřbodový ohyb



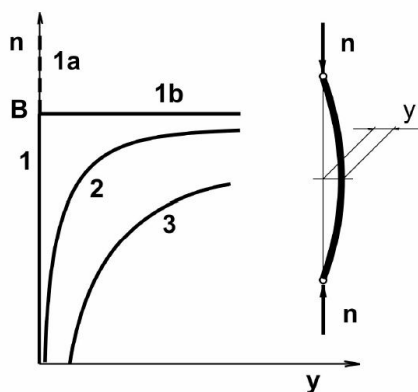
Obr. č.: 15: Průběh ohyb. momentu a příčných sil čtyřbod. ohybu

4 STABILITA DESEK A VÁLCOVÝCH SKOŘEPIN

Existence tlakových napětí v tenkostěnných konstrukcích deskového a skořepinového typu obecně znamená nebezpečí ztráty stability konstrukce. Toto nebezpečí vzniku náhlých deformací je umocněno malou tuhostí plastových konstrukcí. V praxi je tedy nutné posoudit případy vnějších účinků vyvolávajících tlaková membránová napětí, např. osová tlaková zatížení, vnější přetlak.

4.1 Jednoose tlačená deska s rovnými bočními okraji

Základní případ představuje jednoose tlačená ideálně rovná deska s rovnými bočními okraji. Při podkritickém membránovém tlakovém napětí je deska ve stabilní rovnovážné poloze. Dostoupí-li zatížení kritickou hodnotu, vybočí náhle deska ohybem (1b). Přímý tvar 1a již není stabilní. Bod B je bod bifurkace. Ve skutečnosti nelze praktické případy označit z ideální, tj. deska není ideálně rovná, ideálně uložená a ideálně zatížená ve své střední ploše. Proto ve skutečnosti desky vybočují již od počátku zatěžování podle křivek 2,3 viz. obr. č. 16.



Obr. č.: 16: Ztráta stability jednoose tlačené desky s rovnými okraji

4.2 Válcová skořepina s vnějším přetlakem

Působí-li na válcovou nádobu vnitřní podtlak nebo vnější přetlak, vznikají ve stěně membránová tlaková napětí. Při překročení kritické hodnoty přetlaku p_{kr} ztrácí skořepina stabilitu a původně válcový tvar se zplošťuje na oválný tvar. Situace je analogická desce namáha-

né na vzpěr. Myšlený prstenec jednotkové šířky je namáhán obvodovou tlakovou silou.

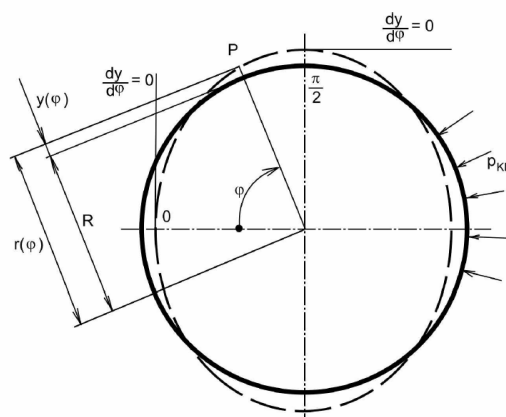
$$n_{\varphi} = pR$$

Přetvořením kruhového prstence do oválu jsou průřezy namáhány obvodovým ohybovým momentem.

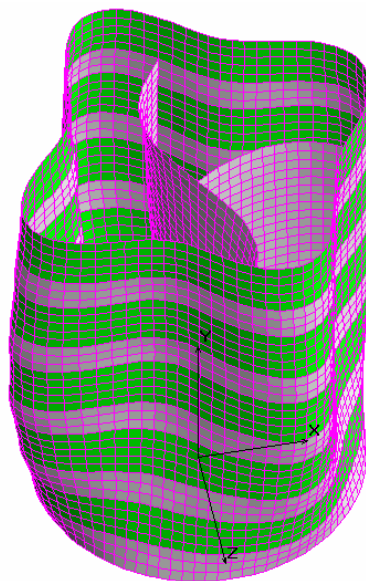
$$m(\varphi) = n_{\varphi} y(\varphi) = p_{kr} R y(\varphi)$$

Změna křivosti je pak:

$$\frac{1}{\rho(\varphi)} - \frac{1}{R} = \frac{m(\varphi)}{D}$$



Obr. č.: 17 Ztráta stability válcové skořepiny vnějším přetlakem



Obr. č.: 18: Praktický případ ztráty stability ČOV vyztužené prstenci

PRAKTICKÁ ČÁST

5 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Praktická část práce zkoumá vliv mechanického zatížení na creep polymerních materiálů v závislosti na čase. Důsledkem creepu je postupná klesající závislost modulu tečení E_t na čase. Modul tečení má přímý vliv na tuhost tělesa nebo součásti, tzn. počáteční deformace vlivem mechanického zatížení má rostoucí charakter. Rychlost změny deformace za čas je nejvyšší na počátku zatížení a s časem klesá. Testovaným materiálem je polypropylen ve dvou modifikacích: PP-H polypropylen homopolymer

PP-B polypropylen blokový

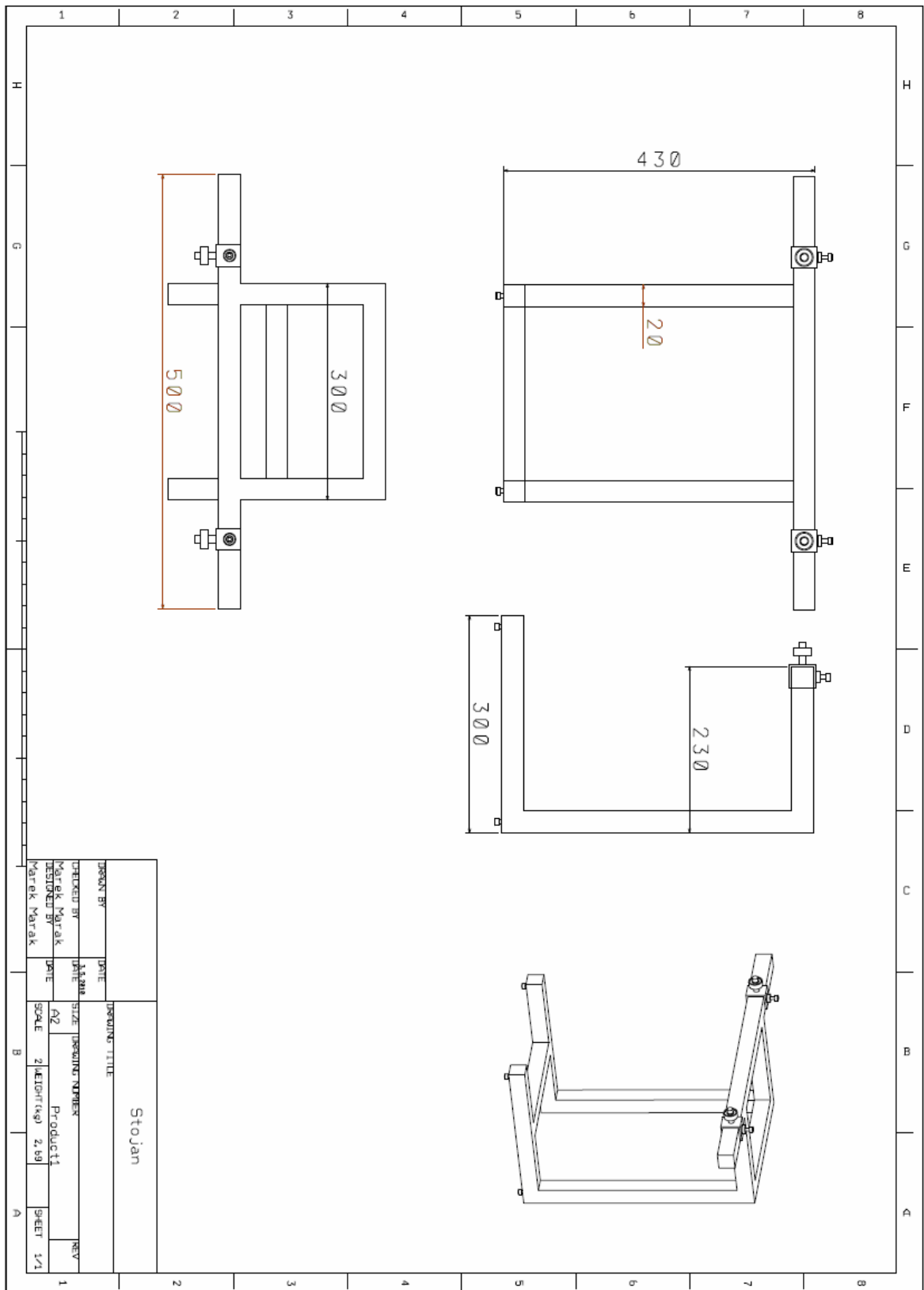
Materiál bude zatěžován tříbodovým a čtyřbodovým ohybem. Hodnoty vznikajícího napětí jsou předem stanovené a vychází z praktického využití polypropylenových desek pro výrobu a provozní podmínky jímek, čističek odpadních vod, bazénů apod.

5.1 Zkušební tělíska

Prvním krokem je příprava zkušebních vzorků. Jako základní polotovar byly použity polypropylenové desky tloušťky 8 mm, vyrobené technologií vytlačování přes širokoštěrbínovou hlavu. Z desek byly nařezány hranoly šíře 10,5 mm a délky 500 mm. Plochy řezu byla obrobena frézováním na konstantní rozměr 10 mm a jakost povrchu po celé délce. Hrany byly zbaveny otřepů smirkovým papírem. Od každého materiálu je připraveno 20 vzorků.

5.2 Měřicí aparatura

Stěžejním úkolem bylo zajistit plynulý a spolehlivý záznam dat z úchylkoměru nepřetržitě po dobu 48 hodin. Prvotní myšlenka použití fotoaparátu jež by disponoval funkcí samočinného snímkování v libovolně nastavených intervalech nebyla realizována. Nejvýhodnější řešením bylo použití webkamery připojené k pc.



Obr. č.: 19 Zkušební přípravek

5.2.1 Měřicí přípravek

Konzole je vyrobena z ocelových dutých profilů čtvercového průřezu o straně 20mm. Jednotlivé díly jsou svařeny a sešroubovány, tak aby byla zajištěna dostatečná tuhost a stojan bylo možné po rozložení pohodlně přepravovat. Celá sestava je tvořena bočními svařenými díly, jež jsou spojovacími tyčemi sešroubovány. V horní části je podpěrná tyč, jež slouží jako vedení posuvným podporám při nastavení vzájemné vzdálenosti. Samotné podpory byly navrženy jako hroty se zaoblením ($R=2\text{mm}$) tak, aby bylo umožněn plynulý posuv s minimálním třením k vyrovnání změny délky průhybem zatíženého nosníku. Přes veškeré úsilí se však třecí podpory neukázaly jako vhodné řešení, jelikož byli zdrojem trhavého nárůstu průhybu nosníku. Třecí podpory byly nahrazeny jednořadými kuličkovými ložisky NTN 8900.

5.2.2 Mechanické zatížení

Zatěžování a vznik ohybového napětí při třibodovém i čtyřbodovém ohybu zajišťují kombinace válcových ocelových závaží opatřených závity M10 a dále kalibrovaná závaží :

2x 490g, 2x 970g, 2x 200g, 100g, 70g, 20g, 10g, 5g .

Závaží zavěšují přes silonový vlasec 0,5mm do předem připravených otvorů pro čtyřbodový ohyb, u třibodového pomocí smyčky kolem celého hranolku, aby nedošlo k zeslabení průřezu v místě nejvyššího namáhání a zkreslení výsledků.

5.2.3 Měření deformace

Zkoumání vlivu zatížení na creep polymerů je založeno na změně modulu tečení E_t v čase. Modul tečení je nepřímo měřen pomocí vzniklé deformace zatíženého nosníku. Měření je průhyb v ose y , vždy uprostřed nosníku, kde je deformace maximální. Měření bylo prováděno pomocí digitálního úchylkoměru Mitutoyo 543 681B.



Mitutoyo 543 681B	
Rozsah měření	0-12,7mm
Přesnost měření	0,01mm
Měřicí síla	$\leq 2\text{N}$
Mezní chyba	0,03mm

Obr. č.20: Úchylkoměr Mitutoyo 543 681B, technické údaje

Úchylkoměr byl upevněn v polohovacím magnetickém stojánku Kinex ON 25 1858. Stojánek je opatřen aretací k jemnému seřízení polohy hrotu měřidla. Magnetická upínací síla stojánku je min. 300N.

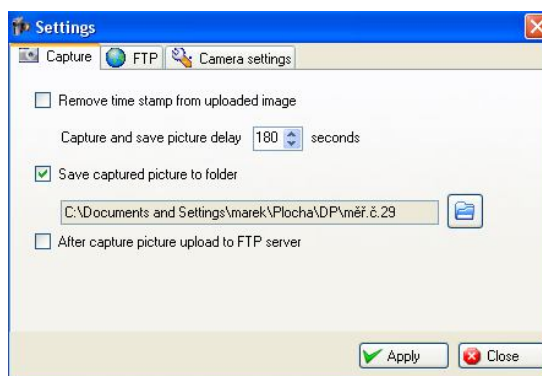
5.3 Záznam měřených dat

Jak již bylo řečeno v úvodu kapitoly, základní otázkou zůstává jakým způsobem spolehlivě zaznamenávat měřené hodnoty deformace v pravidelných intervalech po dobu alespoň 24 hodin.

K tomuto účelu posloužila webová kamera Genius Eye 312 připojená k pc a volně dostupný software Webcam Capture s funkcí opakovaného snímkování v předem nastavených intervalech. Snímky jsou ukládány do přednastavených složek odpovídajících konkrétnímu měření. Každý snímek obsahuje hodnotu deformace a čas.



Obr. č.: 21 Webová kamera Genius Eye 312



Obr. č.: 22 Uživatelské prostředí softwareu Web-cam Capture

6 MĚŘENÍ DEFORMACE

Základním cílem práce je zjistit chování materiálu při tříbodovém a čtyřbodovém ohybu. Toto chování sledujeme za pokojové teploty 23°C a při statickém zatížení polypropylenových nosníků šířky 10mm, výšky 8mm. Měření provádíme pro různé hodnoty napětí σ a to pro 3, 4 a 5MPa. Velikost průhybu je zaznamenáváno pomocí webkamery a softwaru webcam Capture prvních 15 minut vždy po 60 vteřinách, dále každých 30 minut po dobu 24-36 hodin.

V případě tříbodového zatěžování, kde má průběh momentu po zatížené části nosníku lineárně rostoucí charakter směrem od podpor k působišti zatěžovací síly, jde o hodnoty středního napětí σ_s . Maximální hodnota v místě působící síly je dvojnásobkem střední hodnoty, viz. obr. č.24. Příčné síly v místě podpor nabývají hodnoty $F/2$ a v místě působení zatížení $T=F$

Pro čtyřbodový ohyb nabývá průběh ohybového momentu v oblasti mezi podporami konstantní hodnoty. Od podpor směrem k působištím sil ohybový moment klesá až k nulové hodnotě, viz obr. č. 25. Velikost příčných sil T je v oblasti mezi podporami nulová $T=0$.

Při nastavení konkrétních podmínek pro jednotlivá měření jsme vycházeli z dostupných závaží, viz kapitola 4. Dále jsme byli limitováni rozsahem úchylkoměru 0-12,7mm, v neposlední řadě délkou polypropylenových vzorků 500 mm a maximálním rozsahem vzdálenosti podpor měřícího přípravku 500mm.

Při nastavování jednotlivých parametrů bylo snahou přizpůsobit predikovanou deformaci rozsahu úchylkoměru s ohledem na dobu měření. Vycházeli jsme z hodnoty modulu tečení 800 MPa, jež byla určena z prvotních zkušebních měření.

Pokračovali jsme volbou vhodné kombinace závaží a následně byla výpočtem určena přesná vzdálenost podpor L , u čtyřbodového zatížení vzdálenost působících sil c .

K tomuto účelu byl vytvořen v MS Excel jednoduchý výpočetní program, tak abych mohl detailně nastavit parametry experimentu.

Šířka b (mm)	Výška h (mm)	E_t (MPa)	σ_{max} (MPa)	Vzd. podpor L (mm)	Zatížení F (N)	Deform. y_{max} (mm)
10	8	800	5	270	9,5	12,2

Tab. 1: Výpočetní tabulka pro tříbodový ohyb

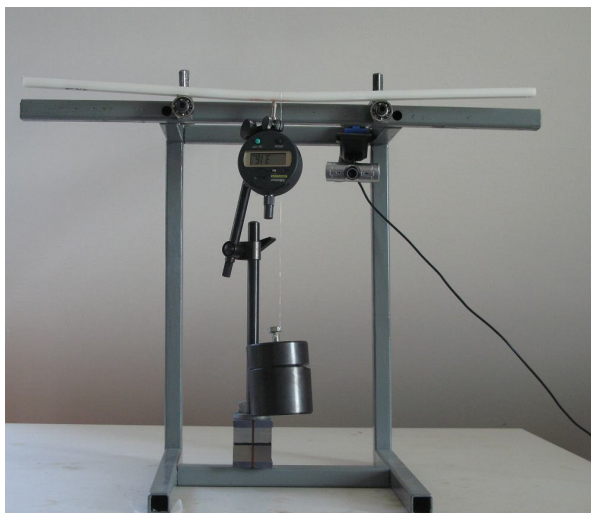
b(mm)	h(mm)	E (MPa)	Napětí (MPa)	Vzd. podpor L(mm)	Vzdál. C (mm)	Zatížení F (N)	Deform. y(mm)
10	8	750	5	250	55,0	9,7	13,0

Tab. 2: Výpočetní tabulka pro čtyřbodový ohyb

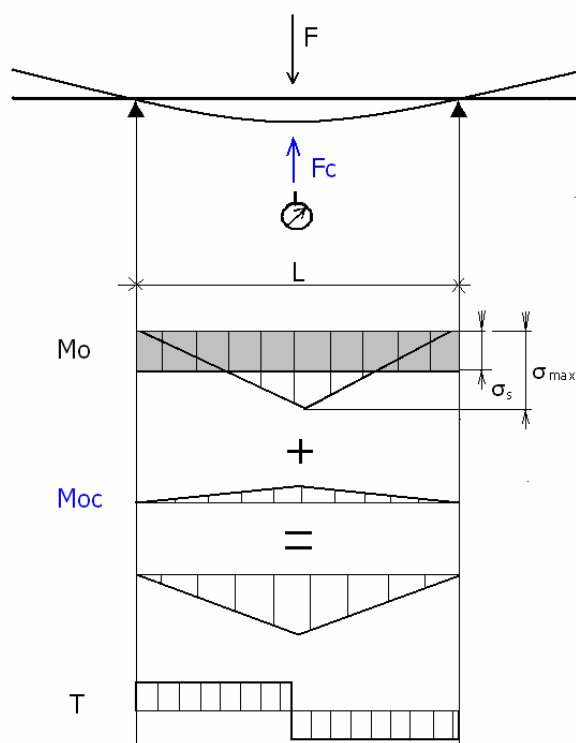
6.1 Tříbodový ohyb

Jakmile jsou zvoleny veškeré hodnoty vstupních parametrů, umístili jsme samotný nosník na nastavené podpory, uprostřed v místě nejvyšší deformace ustavíme stojánek úchylkoměru a hrot přiblížíme spodní vodorovné stěně. Aretačním šroubem polohu hrotu upřesníme. Dále máme připraveno závaží k vyvození výpočtem dané síly F opatřené silonovou strunou k závěsu. Spustíme snímání dat na pc a následuje 60s prodleva k ustavení nosníku se závažím na podpory přípravku. Počátek zatížení je v okamžiku vytvoření prvního snímku. Po 15 minutách změním interval snímkování na 30 minut a měření probíhá samostatně.

$$E_t = \frac{(F - F_c)L^3}{4bh^3y} [MPa]$$



Obr. č.: 23 Měření deformace 3 bodového ohybu



Obr. č.: 24: Schéma 3 bodového ohybu

Úchylkoměr Mitutoyo 543 681B pracuje na principu převodu lineárního pohybu na digitální formu dat. Posuvný jezdec je do výchozí polohy tlačěn plochou vinutou pružinou. Pružina působí silou udávanou výrobcem $\leq 2\text{N}$. Výhodou použití ploché pružiny je nepatrný nárůst tuhosti v závislosti na stlačení výsuvného hrotu.

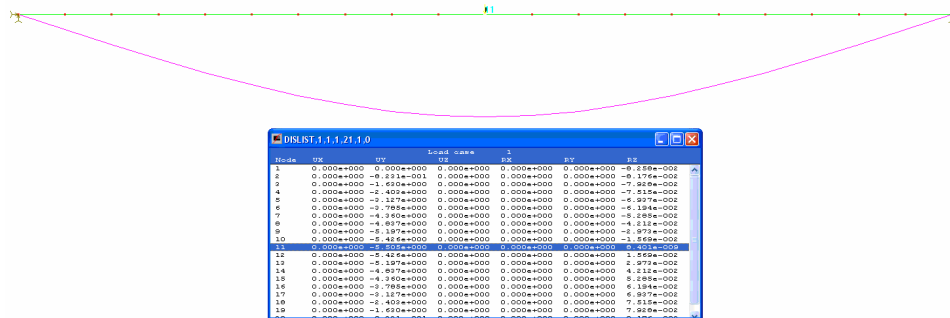
Síla F_c nežádoucím způsobem ovlivňuje zatížení nosníku a je zdrojem chyby. Z hlediska objektivnosti měření jsme ohybové momenty M_o a M_{oc} vznikající od sil F a F_c superponovali (viz obr. č.20) a provedli korekci modulů pružnosti.

Pomocí laboratorních vah a stojanu Kinex ON 25 1858 byl zjištěn přesný průběh síly pružiny úchylkoměru F_c v závislosti na stlačení hrotu v celém rozsahu po krocích 1mm. Výsledný průběh viz. obr. č.21.

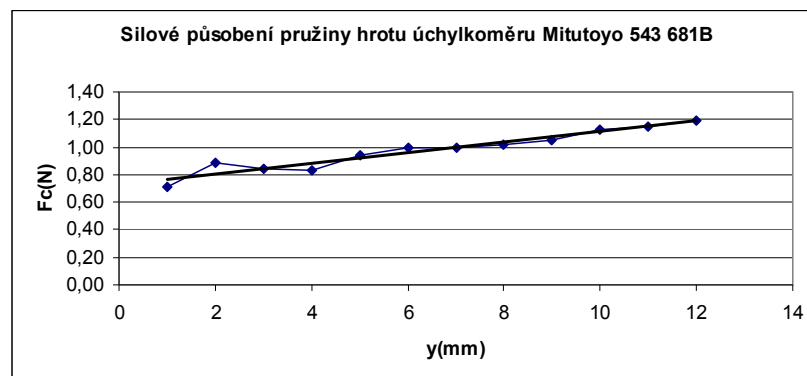
Velikost síly F_c byla zvolena jako průměrná hodnota z rozsahu deformace pro každé z měření.

Kontrola měření byla ověřena modelem pomocí softwaru Cosmos Geostar 2.5

při napětí 5MPa a v čase 3. minuty měření. Z naměřené deformace $y=5,53\text{mm}$ jsem určil odpovídající modul tečení $E_t=1438,8\text{MPa}$. Tuto hodnotu zvolil jako materiálovou konstantu do FEM software a při stejných podmínkách byla verifikovaná deformace $y=5,505\text{mm}$, tedy s rozdílem $0,025\text{mm}$. Měření odpovídá modelu.



Obr. č.: 25 Numerická kontrola metod pomocí FEM software



Obr. č.: 26 Průběh tuhosti pružiny úchylkoměru

6.2 Čtyřbodový ohyb

Dle rozměrů L a c opatřím nosník v místech působí zatěžujících sil otvory. Dále ustavím podle připravených bodů polohu vzorku na podpory. Opět nastavím přesnou polohu hrotu úchylkoměru na nosník, pouze s rozdílem umístění shora na vodorovnou plochu. Další kroky vychází z postupu tříbodového ohybu.

Původní výpočet korekce, kdy z průměrné hodnoty síly pružinky, kdy jsem vypočítal střední hodnotu ohybového napětí (myšlené 3 bodové zatížení ve střední části mezi podporami). Dále z tohoto napětí vypočítal velikost sil F_k , jež jsou odpovídající tomuto napětí při 4 bodovém ohybu a následně je odečetl jako korekci od zatěžujících sil F byl nahrazen následující přesnější metodou:

Korekci sil F a F_c potažmo ohybových momentů M_o , M_{oc} jsem provedl tak, že výsledná naměřená deformace je rozdílem průhybu vyvozeného závažím a opačným směrem působícího hrotu úchylkoměru.

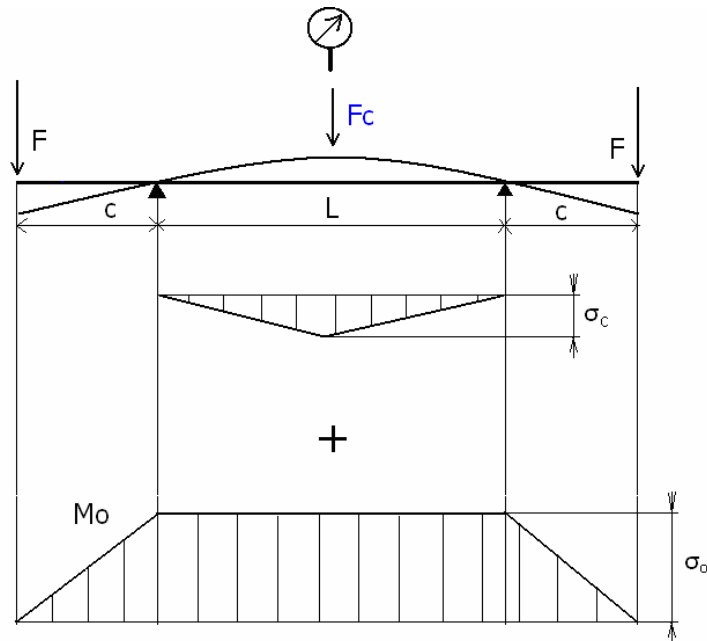
$$y = y_F - y_p = \frac{3FL^2c}{2bh^3E} - \frac{F_c \cdot L^3}{4Ebh^3}$$
$$\Rightarrow E = \frac{L^2(6F \cdot c - F_c L)}{4ybh^3} [MPa]$$

y_F -deformace od zatížení

y_c -deformace vyvozená úchylkoměrem

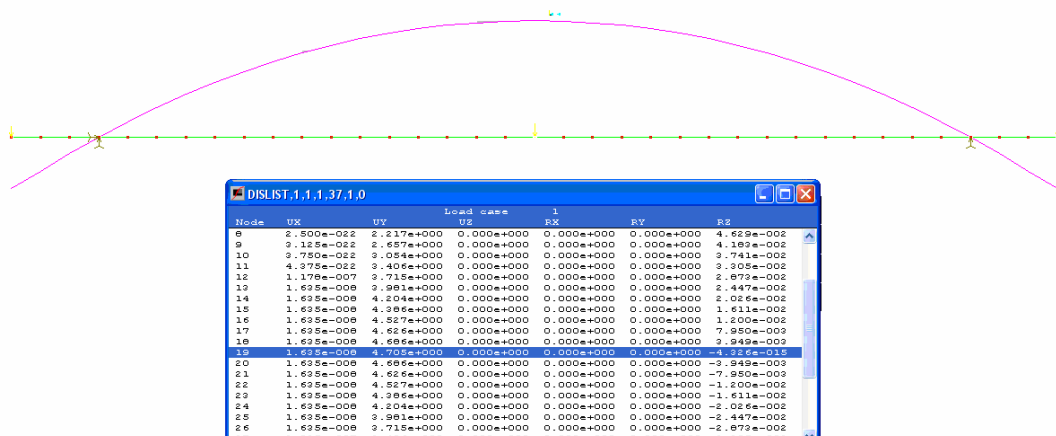


Obr. č.: 27 Měření deformace čtyřbodového ohybu



Obr. č.: 28 Schéma 4 bodového ohybu

Správnost měření jsem ověřil pomocí softwaru Cosmos Geostar 2.5 při napětí 4MPa. Naměřená deformace $y=4,6\text{mm}$ odpovídá modulu tečení $E_t=2168\text{MPa}$. Verifikací za stejných podmínek bylo dosaženo průhybu $y=4,705\text{mm}$, chyba měření tedy činí $0,105\text{mm}$. Měření je správné.



Obr. č.: 29 Numerická kontrola čtyřbodového ohybu pomocí FEM software.

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ

Každé měření je zdrojem časového průběhu průhybu nosníku ve vertikálním směru y . Průhyb je měřen v místě, kde nabývá maximální hodnoty, uprostřed vzdálenosti podpor.

Modul tečení s rostoucím průhybem klesá. Na deformaci má taktéž vliv modul průřezu v ohybu W_o , jež je dán obecně geometrií, rozměry profilu nosníku a polohou neutrální osy, dále teplota a v neposlední řadě hodnota vyvozeného ohybového napětí. Přepoččet vychází z následujících vztahů. K porovnání modulu tečení byly vzorky podrobeny trhací zkoušce na trhačce Zwick. Výsledky jsou uvedeny v tab. č.1.

Třibodový ohyb

$$E_t = \frac{(F - F_c)L^3}{4bh^3y} [MPa]$$

Čtyřbodový ohyb

$$\Rightarrow E_t = \frac{L^2(6F \cdot c - F_c L)}{4ybh^3} [MPa]$$

b-šířka nosníku (mm)

h- výška nosníku (mm)

y-maximální průhyb ve vertikálním směru (mm)

L-vzdálenost podpor (mm)

c-vzdálenost podpor a působíště sil F (4 bod. ohyb)

F-zatěžující síla (N)

F_c- síla hrotu úchylkoměru

	PP-B	PP-H
č.m.	E (MPa)	E(MPa)
1	1682,74	1824,09
2	1653,57	1875,31
3	1650,17	1804,39
4	1628,53	1736,68
5	1628,23	1743,66
Et (MPa)	1648,7±20,05	1796,8±51,8

Tab. 3: Modul pružnosti v tahu stanoven pomocí trhacího stroje

č.m.	3 bodový o.	4 bodový o.	3 bodový o.	4 bodový o.
	PP-H		PP-B	
1	1720,82	2332,41	1758,07	2074,33
2	1673,22	2280,68	1609,1*	2083,18
3	1799,02	2291,9	1781,01	2068,23
4	1803,59	2083,02*	1724,68	2277,46*
5	1766,94	2241,71	1759,99	2189,48
E (MPa)	1752,7±45,2	2286,7±32	1727±56	2103,8±49,7

Tab. 4: Modul pružnosti v ohybu zjištěný na trhacím stroji

Hodnoty modulu tečení při ohybu tříbodovém odpovídají hodnotám stanoveným při tahové zkoušce na trhacím stroji. Čtyřbodový ohyb provedený na trhacím stroji Zwick vykazuje vyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu u obou materiálů, jež se prokázalo i při měření modulu tečení při čtyřbodovém měření, viz. tab.3 a 4. Tyto vzniklé imperfekce patrně souvisí s principem čtyřbodového ohybu, průběhem ohybového momentu a příčných sil.

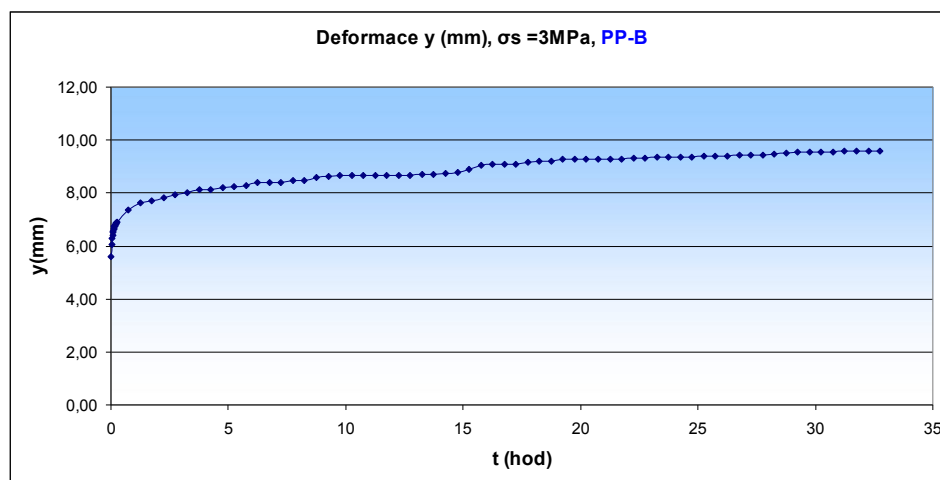
7.1 Tříbodový ohyb

7.1.1 Blokový polypropylen PP-B

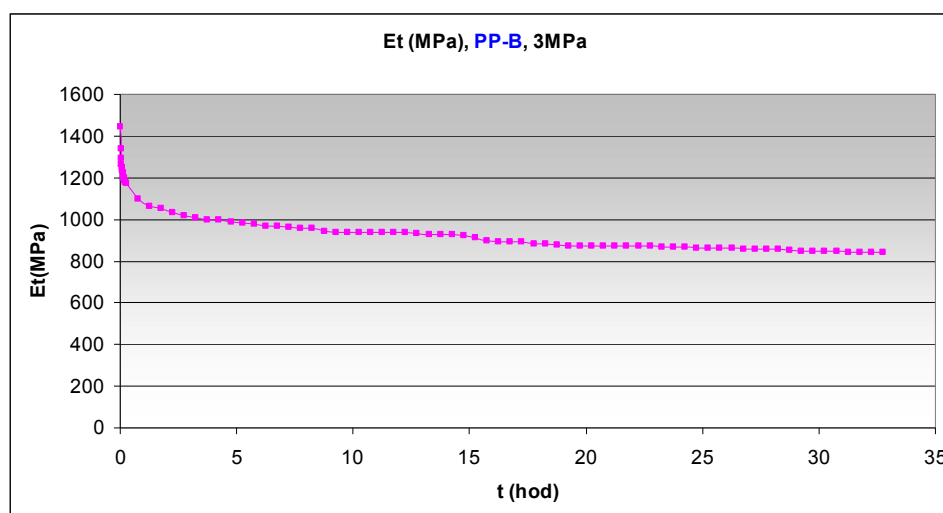
Ohybové napětí $\sigma_s=3\text{MPa}$

σ_s (MPa)	σ_{\max} (MPa)	L (mm)	M (g)	F (N)	F_p (N)
3	6	269,5	980	9,6	1,022

Tab. 5 Parametry měření



Obr. č.: 30 Průběh deformace nosníku při ohybovému napětí 3 MPa, PP-B



Obr. č.: 31 Průběh modulu tečení na čase pro ohybovému napětí 3 MPa, PP-B

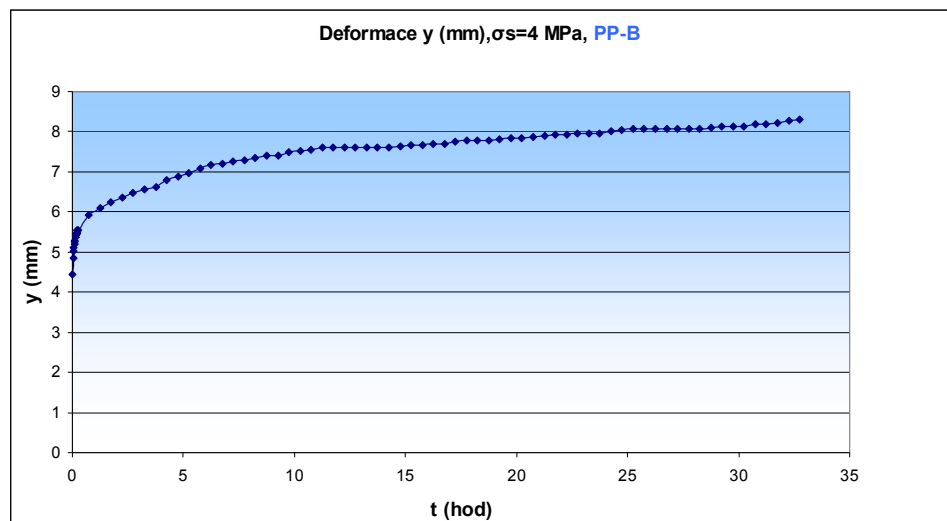
Na základě deformace byla na počátku měření PP-B při napětí 3 MPa hodnota modulu tečení $E_t=1446\text{MPa}$. Po hodině hodnota klesla o 365 MPa. Ve 24. hodině byla hodnota modu-

lu o 581MPa nižší, tedy klesl na 865MPa. Hranice $E_t=1000\text{MPa}$ byla překročena po 3,75 hodinách.

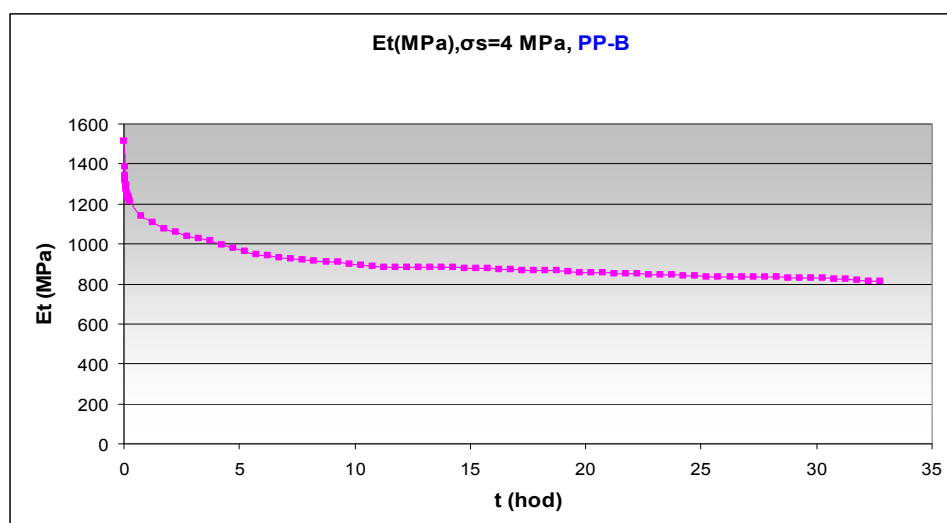
Ohybové napětí $\sigma_s=4\text{MPa}$

σ_s (MPa)	σ_{\max} (MPa)	L (mm)	M (g)	F (N)	F_p (N)
4	8	207	1680	16,48	0,94

Tab. 6 Parametry měření



Obr. č.: 32 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 4 MPa, PP-B



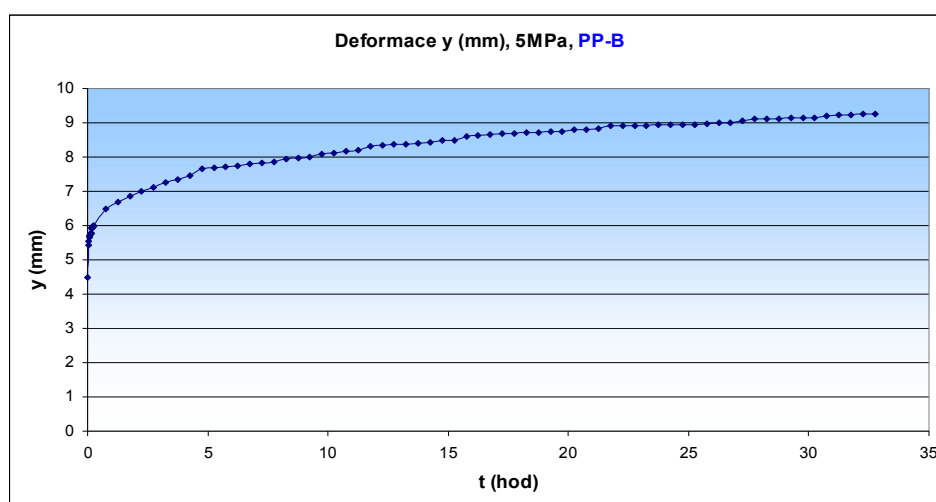
Obr. č.: 33 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 4MPa, PP-B

Pro napětí 4MPa je při počátku zatížení hodnota modulu $E_t=1512\text{MPa}$, dále po hodině měření klesl o 390MPa. Po 24 hodinách je hodnota 843MPa. Hranice $E_t=1000\text{MPa}$ byla překročena po 4 hodinách.

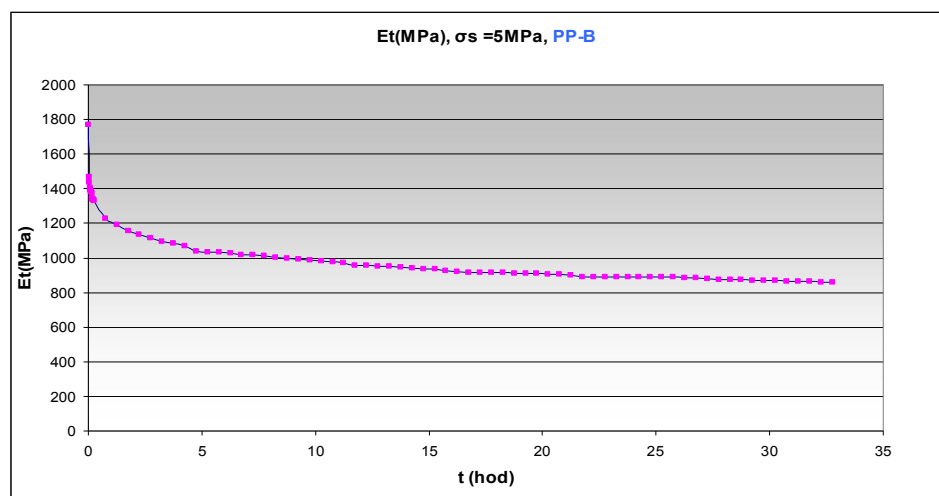
Ohybové napětí $\sigma_s=5\text{MPa}$

σ_s (MPa)	σ_{\max} (MPa)	L (mm)	M (g)	F (N)	F_p (N)
5	10	200,3	2170	21,3	1,022

Tab. 7 Parametry měření



Obr. č.: 34 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 5MPa, PP-B



Obr. č.: 35 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 5MPa, PP-B

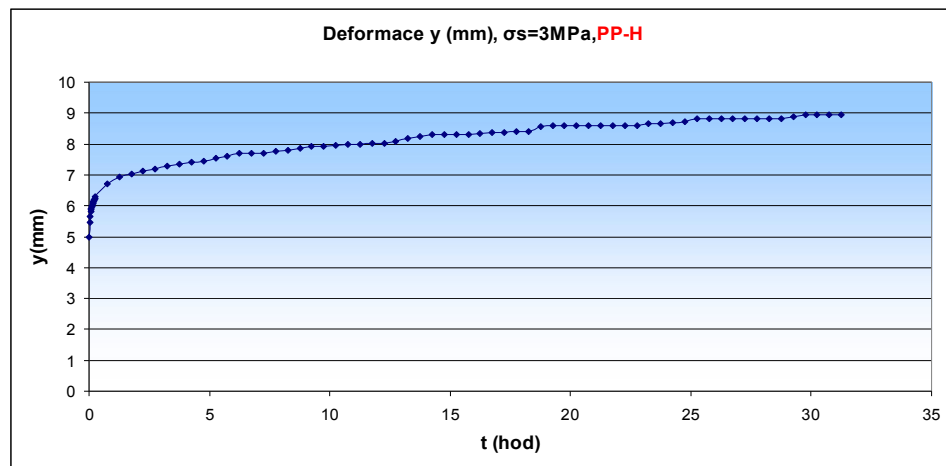
Pro případ 3bodového zatížení napětím 5MPa materiálu PP-B je počáteční modul tečení $E_t=1772\text{MPa}$. Po 1 hodině klesá na hodnotu 1208MPa. Ve 24. hodině je rozdíl E_t o 881MPa vůči počátku. Hranici 1000MPa překročí po 8,25hod.

7.1.2 Polypropylen homopolymer PP-H

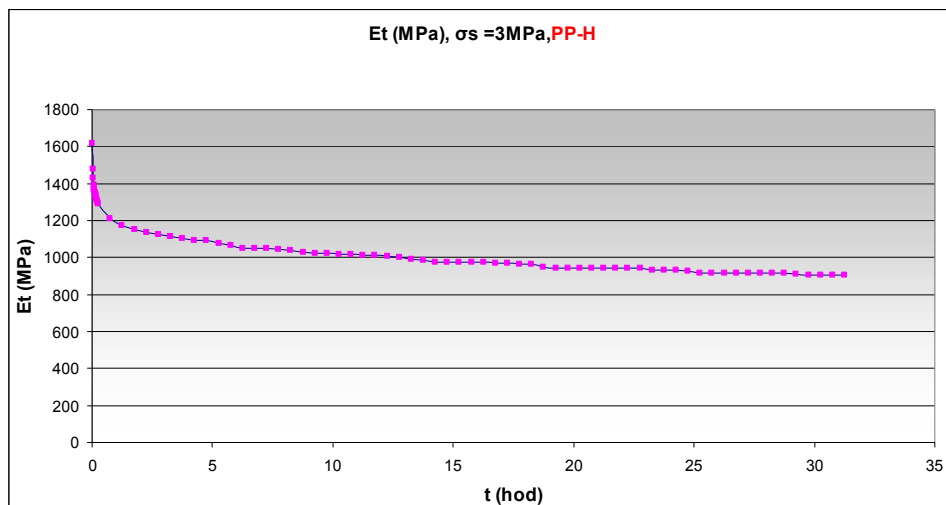
Ohybové napětí $\sigma_s=3\text{MPa}$

σ_s (MPa)	σ_{\max} (MPa)	L (mm)	M (g)	F (N)	F_p (N)
3	6	269,5	980	9,6	1,022

Tab. 8 Parametry měření



Obr. č.: 36 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 3MPa, PP-H



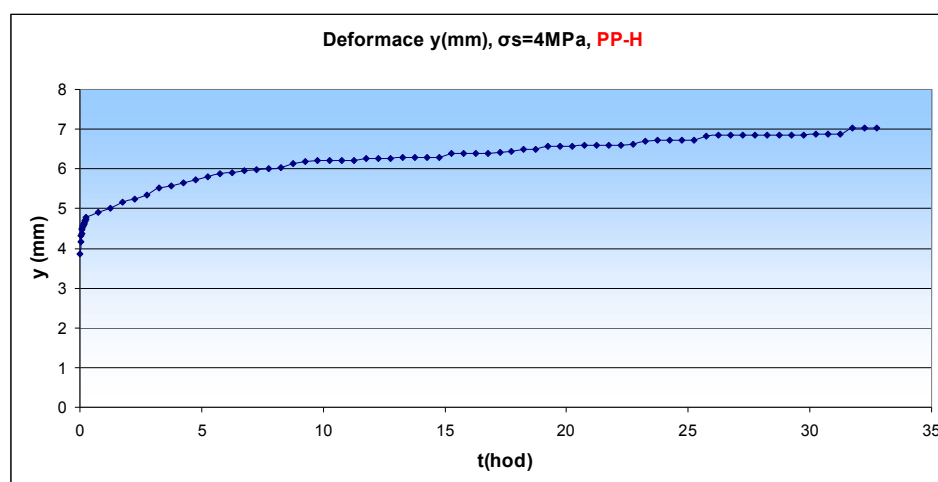
Obr. č.: 37 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 3MPa, PP-H

V případě ohybového napětí 3MPa u PP homopolymeru byly zjištěny následující hodnoty. Počáteční modul tečení $E_t=1620\text{MPa}$, po hodině klesá o 430MPa. Ve 24. hodině pokračuje klesající průběh na 933MPa. Hodnotu $E_t=1000\text{MPa}$ překročí v čase 12,75hod.

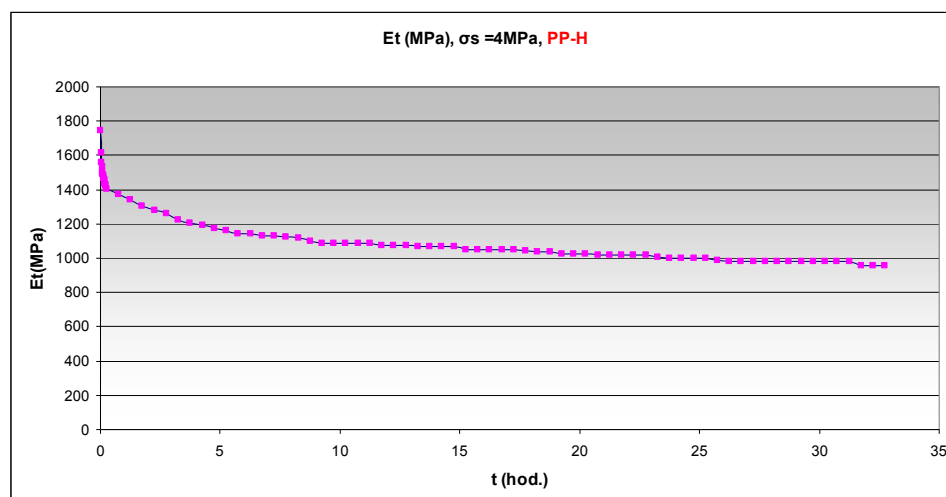
Ohybové napětí $\sigma_s=4\text{MPa}$

σ_s (MPa)	σ_{\max} (MPa)	L (mm)	M (g)	F (N)	F_p (N)
4	8	207	1680	16,48	0,94

Tab. 9 Parametry měření



Obr. č.: 38 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 4MPa, PP-H



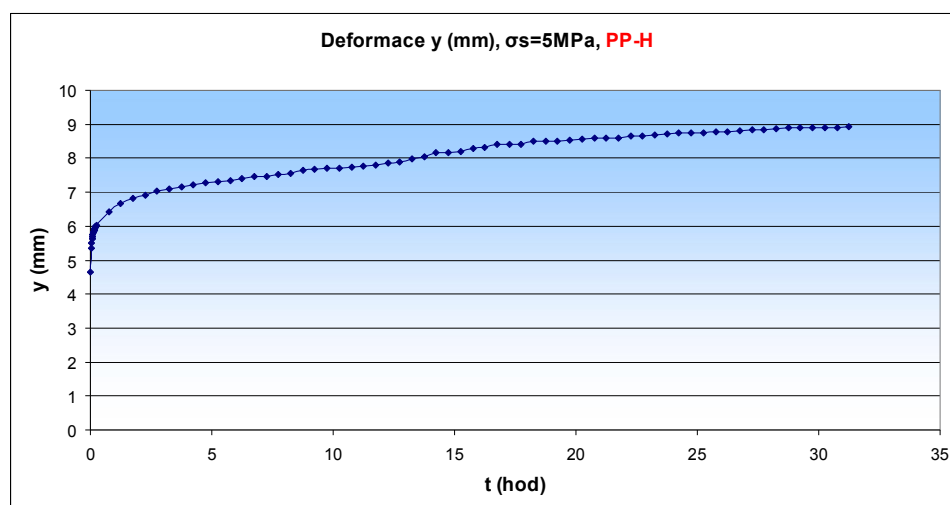
Obr. č.: 39 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 4MPa, PP-H

Pro napětí 4MPa je počáteční hodnota $E_t=1743\text{MPa}$, po hodině klesá o 386MPa. Hranice $E_t=1000\text{MPa}$ je překročena v čase 25,25hod.

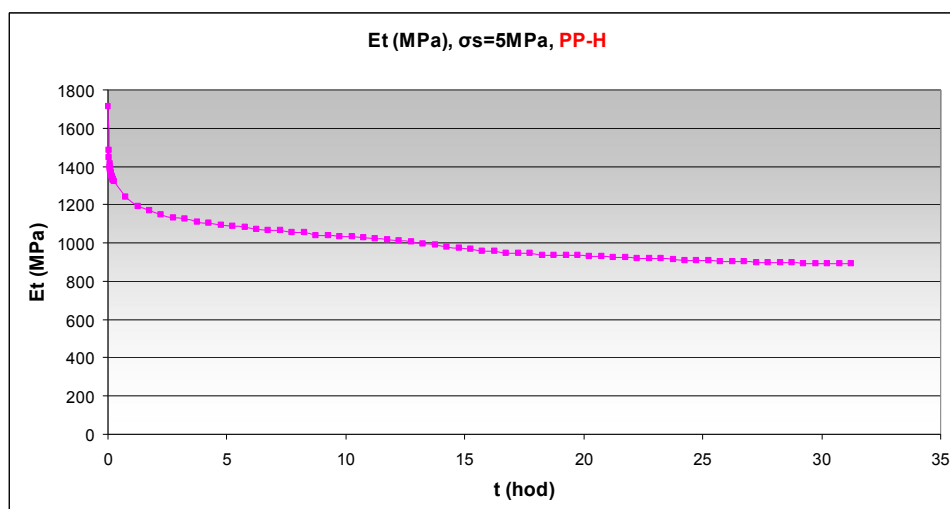
Ohybové napětí $\sigma_s=5\text{MPa}$

σ_s (MPa)	σ_{\max} (MPa)	L (mm)	M (g)	F (N)	F_p (N)
5	10	200,3	2170	21,3	1,022

Tab. 10 Parametry měření



Obr. č.: 40 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 5MPa, PP-H



Obr. č.: 41 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 5MPa, PP-H

Při 5MPa vykazuje PP-H na počátku E_t 1711MPa, po 60 minutách klesá na 1215MPa. Ve 24. hodině pokles na 910MPa. Hranice 1000MPa je překročena po 13 hodinách.

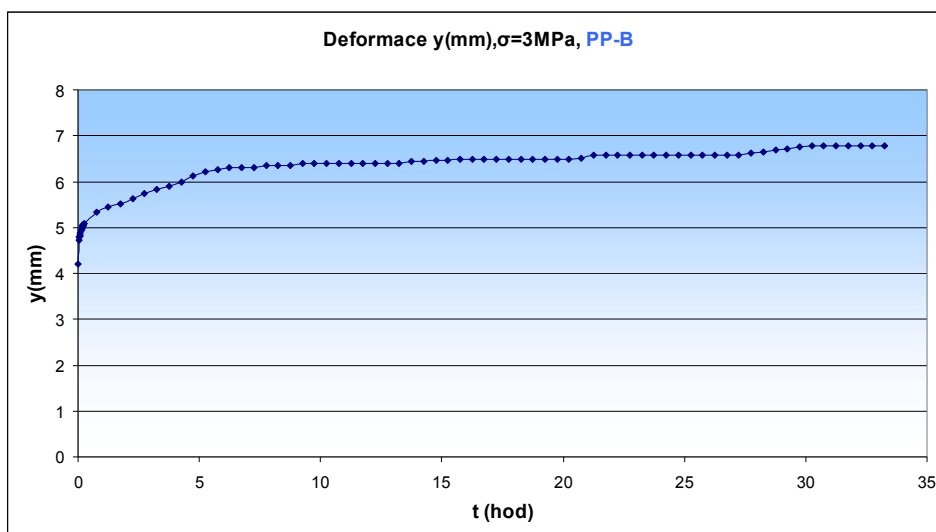
7.2 Čtyřbodový ohyb

7.2.1 Blokový polypropylen PP-B

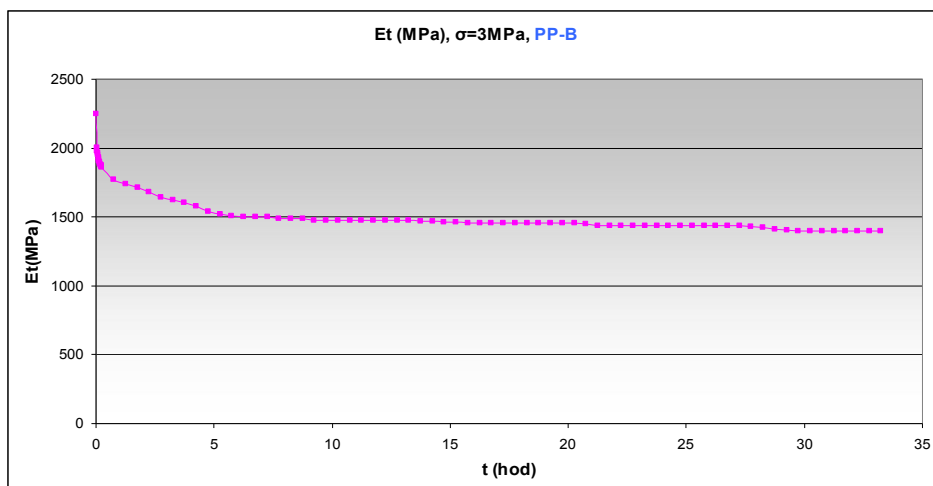
Ohybové napětí $\sigma_s=3\text{MPa}$

σ (MPa)	C (mm)	L (mm)	M (g)	F (N)
3	32,9	350	990	9,71

Tab. 11 Parametry měření



Obr. č.: 42 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 3MPa, PP-B



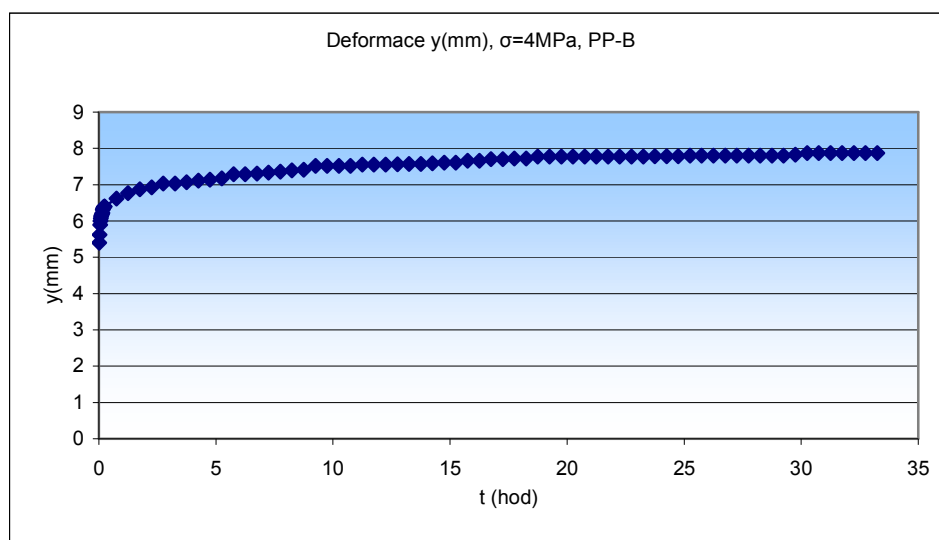
Obr. č.: 43 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 3MPa, PP-B

Při čtyřbodovém ohybu bylo při napětí 3MPa dosaženo následujících hodnot. Pro blokový polypropylen je počáteční hodnota E_t 2246MPa. Po 60 minutách klesá o 490MPa. Při 24. hodině je pokles na hodnotu 1437MPa.

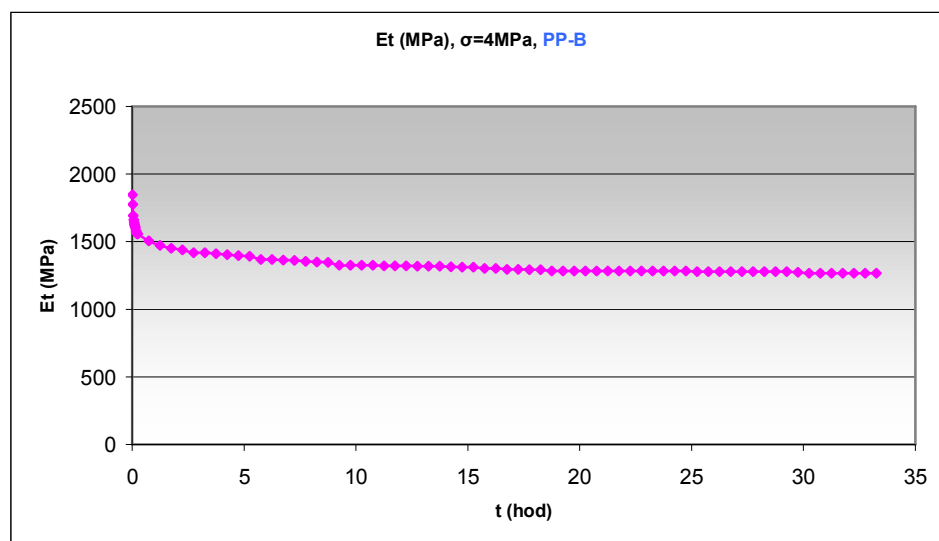
Ohybové napětí $\sigma_s=4\text{MPa}$

σ (MPa)	C (mm)	L (mm)	M (g)	F (N)
4	29,4	300	1480	14,5

Tab. 12 Parametry měření



Obr. č.: 44 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 4MPa, PP-B



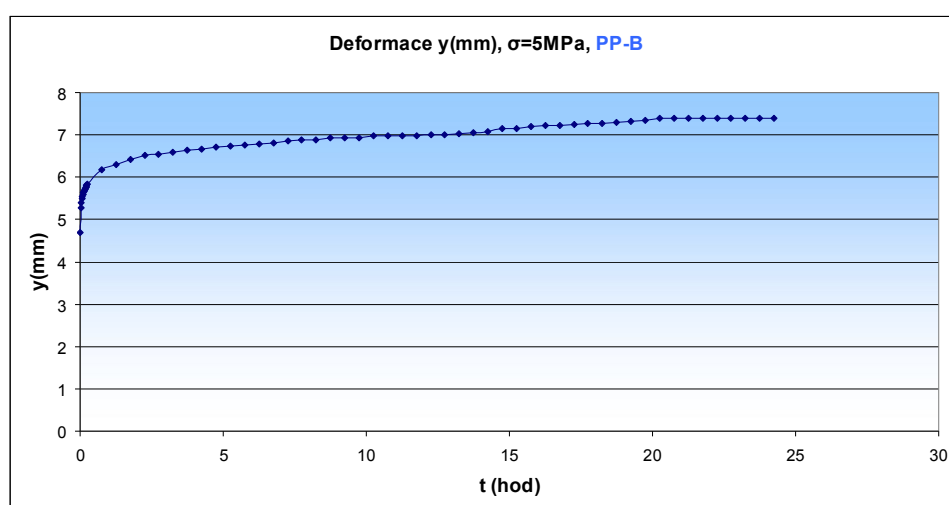
Obr. č.: 45 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 4MPa PP-B

Pro 4MPa vykazuje vzorek v 1. minutě měření hodnotu 1847MPa. Po 60 minutách je modul tečení 1490MPa. V čase 24. hodin od počátku klesá modul na hodnotu 1437MPa.

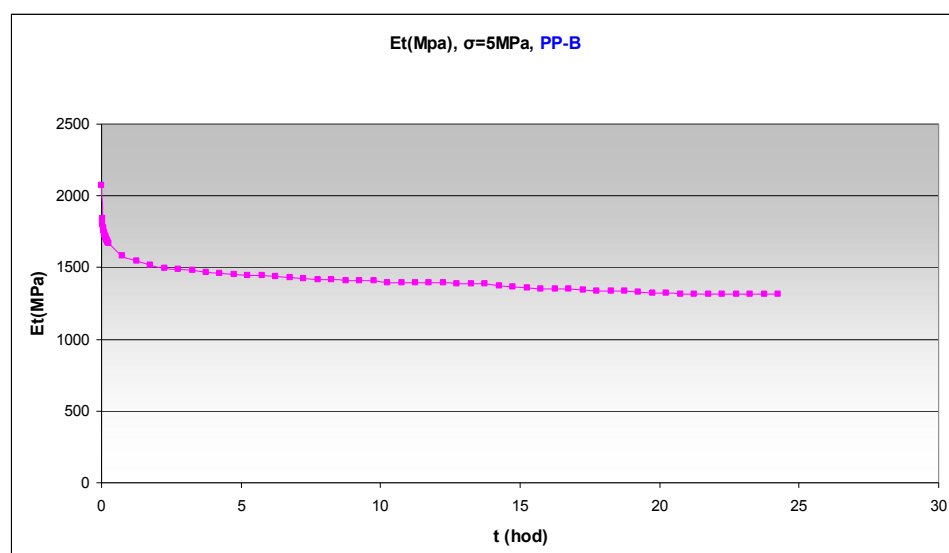
Ohybové napětí $\sigma_s=5\text{MPa}$

σ (MPa)	C (mm)	L (mm)	M (g)	F (N)
5	36,8	260	180	14,5

Tab. 13 Parametry měření



Obr. č.: 46 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 5MPa, PP-B



Obr. č.: 47 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 5MPa, PP-B

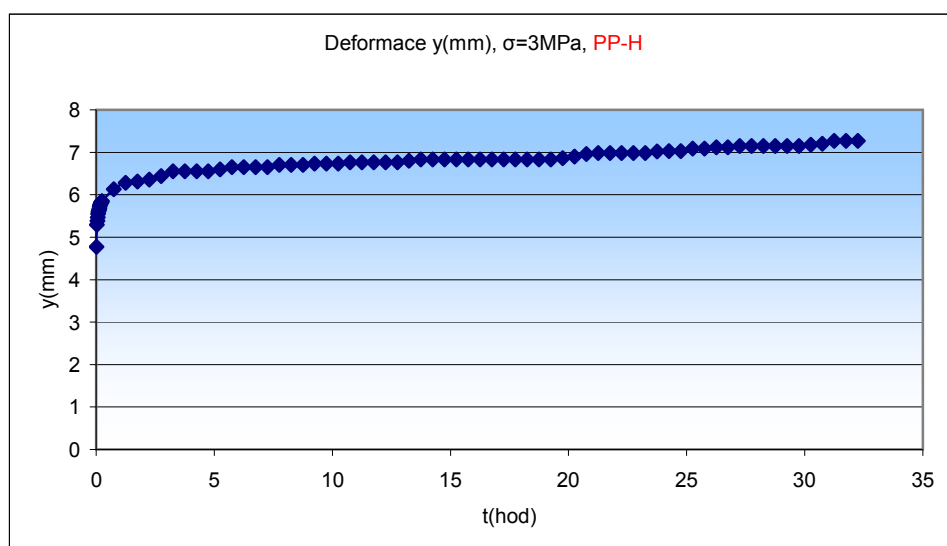
Ohybovému napětí 5MPa odpovídá počáteční hodnota $E_t=2073\text{MPa}$. Dále po 60 minutách klesá o 511MPa. Po 24 hodinách vykazuje modul tečení 1319MPa.

7.2.2 Polypropylen homopolymer PP-H

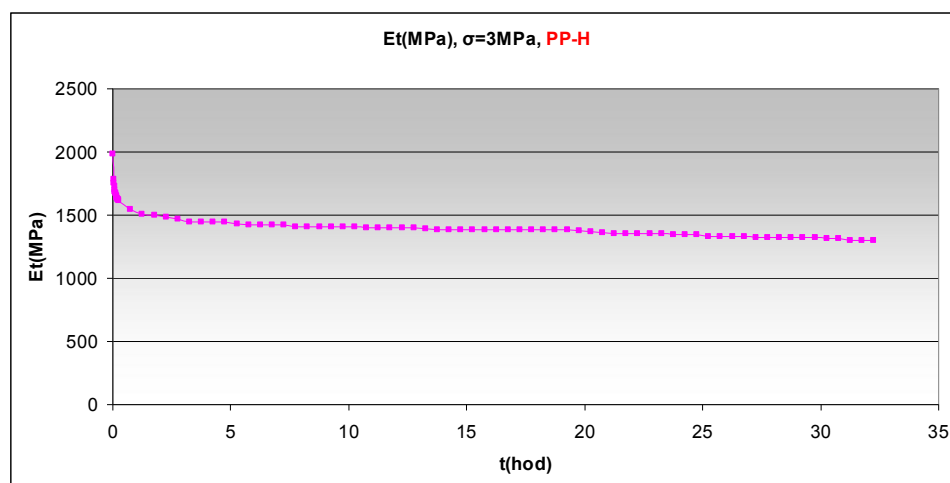
Ohybové napětí $\sigma_s=3\text{MPa}$

σ (MPa)	C (mm)	L (mm)	M (g)	F (N)
3	32,9	350	990	9,71

Tab. 14 Parametry měření



Obr. č.: 48 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 3MPa, PP-H



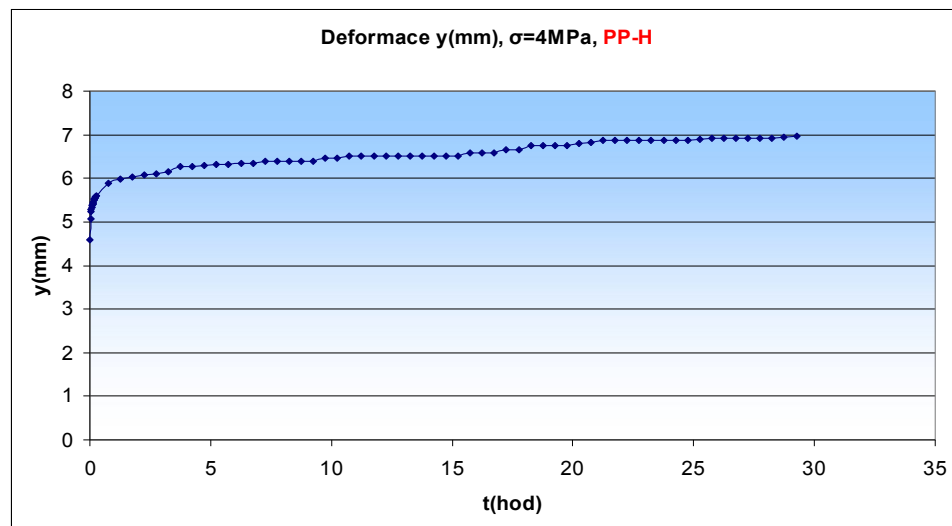
Obr. č.: 49 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 3MPa, PP-H

Pro 3Mpa čtyřbodového ohybu vykazuje PP-H na počátku modul tečení $E_t=1982\text{MPa}$, po 60 minutách klesá na 1523MPa . Po 24 hodinách jsem zaznamenal pokles o 636MPa .

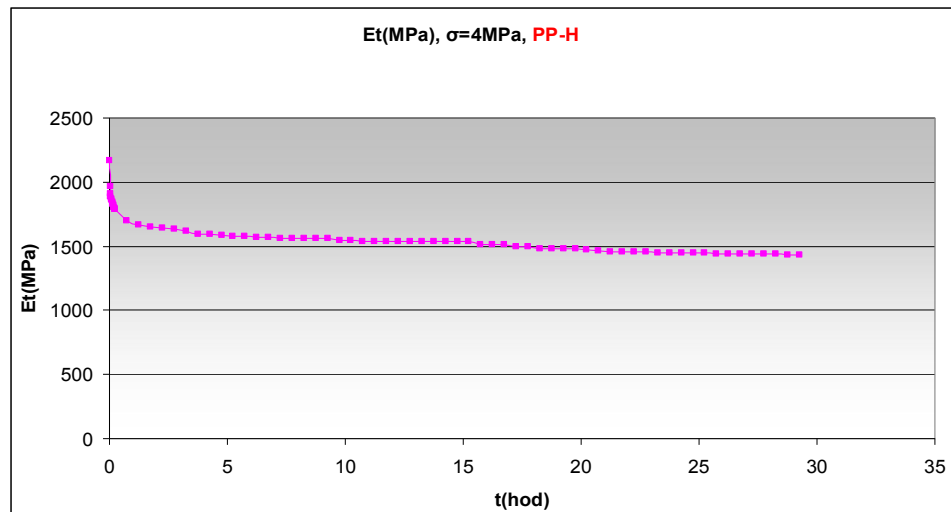
Ohybové napětí $\sigma_s=4\text{MPa}$

σ (MPa)	C (mm)	L (mm)	M (g)	F (N)
4	29,4	300	1480	14,5

Tab. 15 Parametry měření



Obr. č.: 50 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 4MPa , PP-H



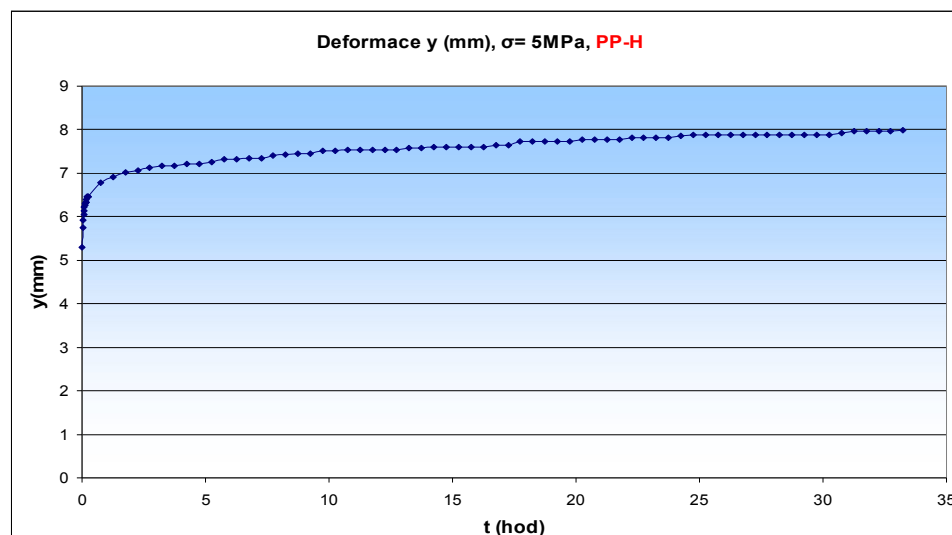
Obr. č.: 51 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 4MPa, PP-H

V případě 4MPa u stejného materiálu má na počátku 1847 MPa a po 60 minutách klesá na 1490MPa.

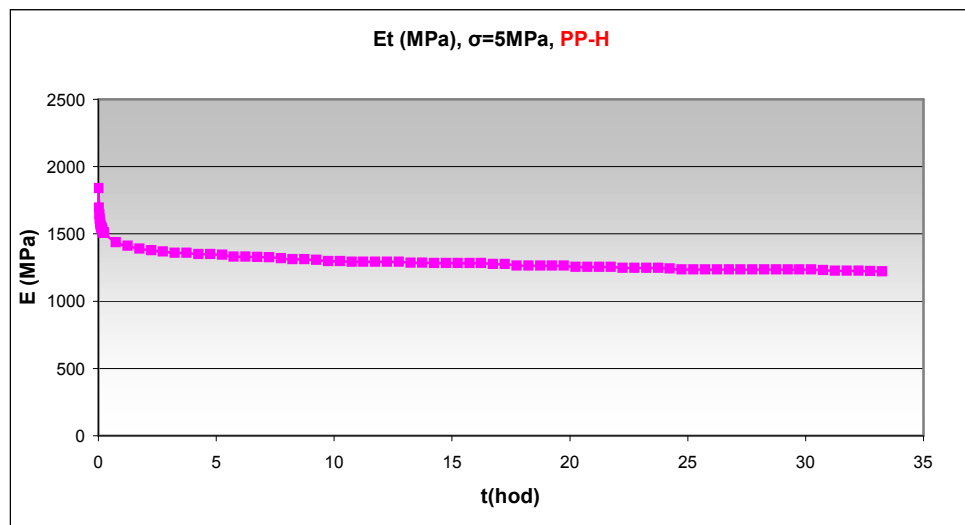
Ohybové napětí $\sigma_s=5\text{MPa}$

σ (MPa)	C (mm)	L (mm)	M (g)	F (N)
5	36,8	260	1480	14,5

Tab. 16 Parametry měření



Obr. č.: 52 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 5MPa, PP-H



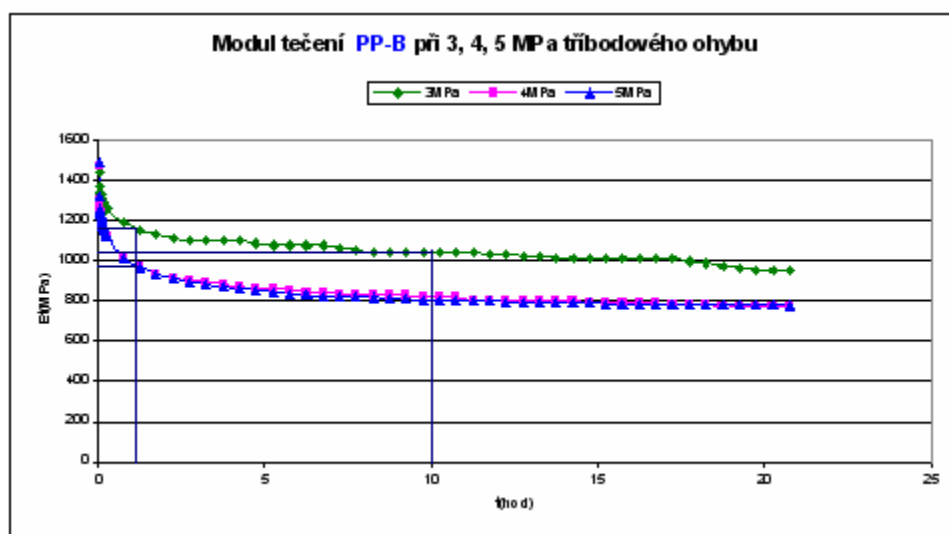
Obr. č.: 53 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 5MPa, PP-H

Nejvyšší z měřených napětí vykazuje na počátku hodnotu modulu tečení E_t 2073MPa, po 60 minutách klesá na 1562 MPa a po 24 hodinách klesá o 754MPa na 1319Mpa.

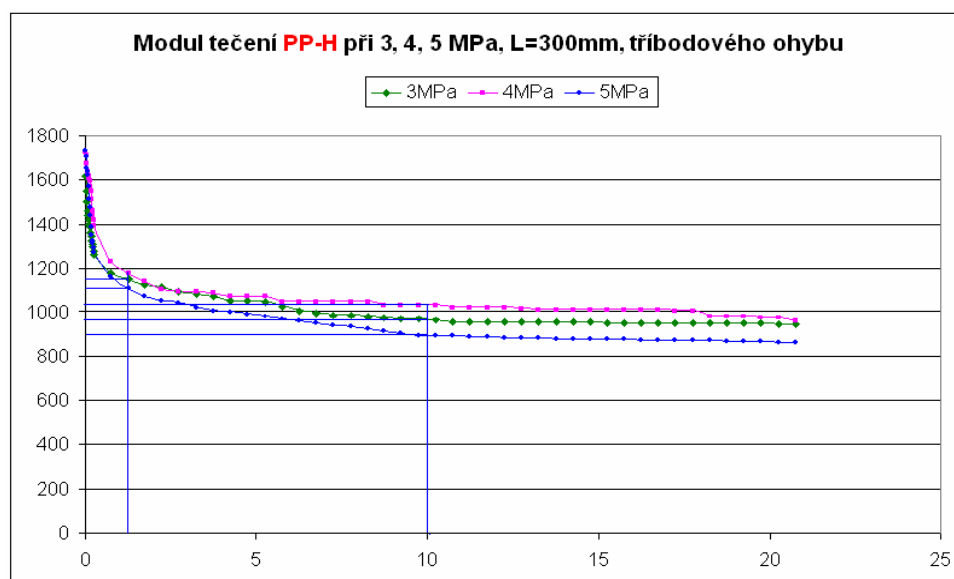
7.3 Diskuze výsledků

Testovali jsme 2 typy materiálů, polypropylen blokový PP-B a polypropylen homopolymer PP-H, jež se užívají při navrhování a výrobě svařovaných nádob, septiků, ČOV apod.

Z výsledků je patrný výraznější pokles modulu tečení při vyšším ohybovém napětí. Na počátku zatížení nabývá modul tečení maximální hodnoty. Pokles je nejvýraznější na počátku, s přibývajícím časem je mírnější.



Obr. č.: 54: Srovnání modulů tečení PP-B při 3 bodovém ohybu pro ohyb. napětí 3, 4 a 5 MPa při konstantní vzdálenosti podpor

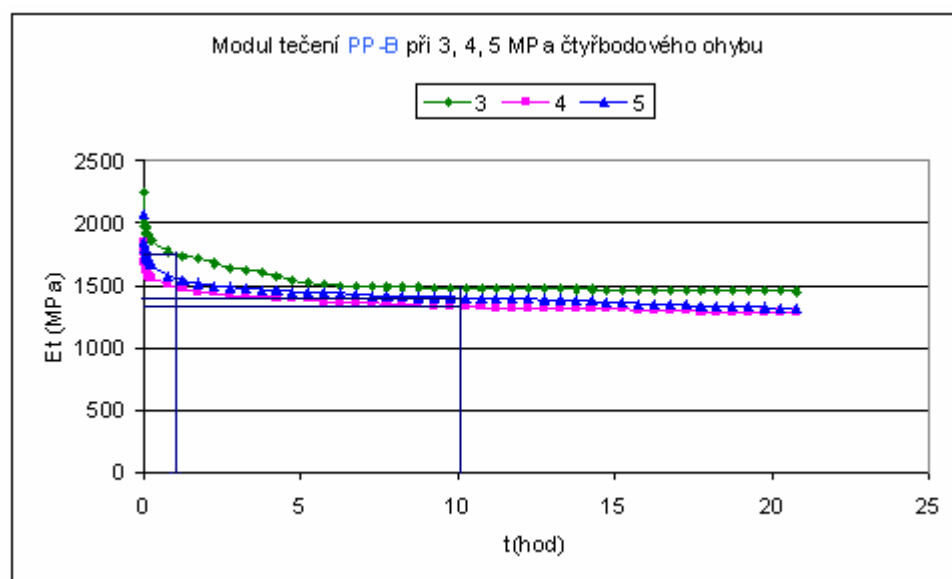


Obr. č.: 55: Srovnání modulů tečení PP-H při 3 bodovém ohybu pro ohyb. napětí 3, 4 a 5 MPa při konstantní vzdálenosti podpor.

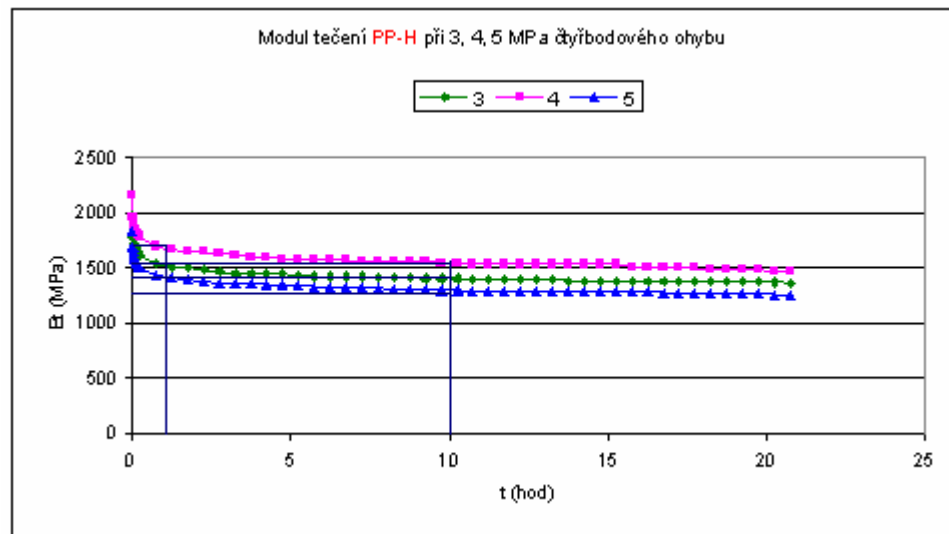
Blokový polypropylen PP-B zatížený třibodovým ohybem, vykazuje na počátku modul tečení 1600 MPa . Po 1 hodině klesá přibližně o 360MPa, po 24 hodinách nabývá hodnoty modulu tečení kolem 900 MPa v závislosti na ohyb. napětí. Materiál PP-H nabývá na počátku hodnotu přibližně 1700MPa. Po 60minutách klesá modul tečení podle aplikovaného napětí o 400 až 500MPa .Po 24 hodinách je při napětí $\sigma=3$ modul tečení $E_t=933$ MPa. Při napětí $\sigma=5$ MPa je $E_t=910$ MPa.

Polypropylen homopolymer PP-H zatížený třibodovým ohybem, vykazuje modul tečení na počátku přibližně 1700 MPa. Po 60 minutách klesá asi na 1150MPa. Po 10 hodinách modul tečení nabývá hodnoty asi 1000MPa v závislosti na ohybovém napětí.

Pro srovnání bylo provedeno odpovídající měření pro 4 bodový ohyb pro materiály PP-B, PP-H. Výsledný modul nabývá poněkud vyšších hodnot oproti 3bodovému zatěžování. Tato anomálie pravděpodobně souvisí s rozdílným principem čtyřbodového ohybu, odlišným průběhem ohyb. momentu a příčných sil podél nosníku. Blokovaný polypropylen klesá z počátečního modulu asi 2200 MPa obdobným způsobem jako při třibodovém ohybu. Přibližně po 10 hodinách mívá hodnotu 1350-1500 MPa dle velikosti ohybového napětí. Chování PP-H je při čtyřbodovém ohybu obdobné, počáteční hodnota modulu tečení se pohybuje kolem 2000MPa v závislosti na ohybovém napětí. Po 60 minutách je pokles modulu přibližně o 500MPa. V čase 10 hodin od počátku měření je pokles o 600MPa.



Obr. č.: 56: Srovnání modulů tečení PP-B při 4 bodovém ohybu pro ohyb. napětí 3, 4 a 5 MPa.



Obr. č.: 57: Srovnání modulů tečení PP-H při 4 bodovém ohybu pro ohyb. napětí 3, 4 a 5 MPa.

Na obr. 54 až 57 je znázorněn vzájemný posuv křivek creepového modulu při ohybovém napětí 3, 4, a 5 MPa. Lze pozorovat zpravidla nižší modul tečení při zvyšujícím se ohybovém napětí. Tato diference se při naměřených krátkodobých intervalech pohybuje od 0 do 200 MPa v rozmezí ohybových napětí 3 až 5 MPa.. Pro dlouhodobé měření v délce 1 roku je rozdíl modulů tečení kolem 30 MPa v rozmezí ohyb. napětí 3-5 MPa, hodnoty E_t se pohybují od 390 do 420 MPa pro PP-H.

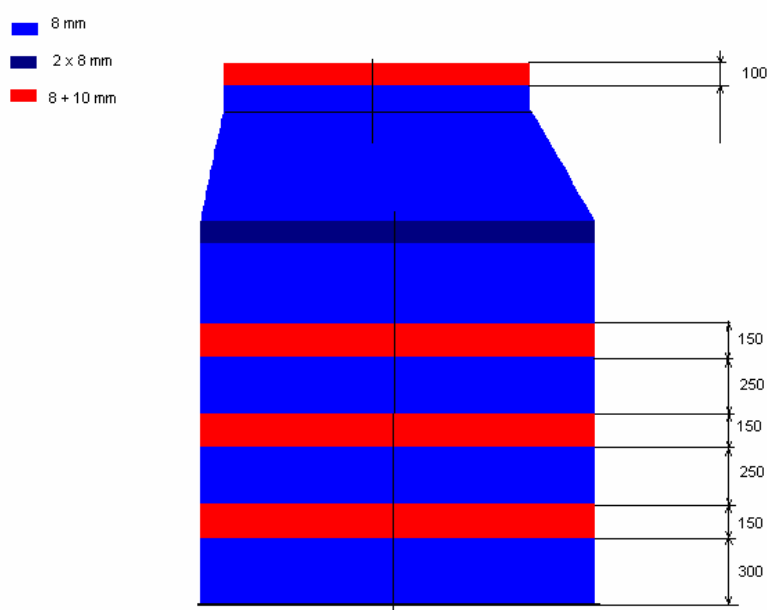
8 APLIKACE VÝSLEDKŮ V PRAXI

Práce je koncipována s ohledem na využití výsledků v průmyslu. Parametry měření, zkoumaný materiál atd. navazují na praktické zkušenosti při návrhu svařovaných konstrukcí z polypropylenu. Je celá řada aplikací, kdy je důležité krátkodobé chování polymerních materiálů při namáhání. Z nejběžnějších výrobků jsou to čističky odpadních vod, jímky, bazény apod. Nádoby jsou zpravidla umístěny v zemi a namáhány hydrostatickým tlakem obsypu zeminy a tlakem samotné náplně. Nádoby jsou dimenzovány a kontrolovány z hlediska maximálního dovoleného napětí, deformace a kontroly stability.

Při běžném provozu je působení obsypu a náplně jímky částečně vyrovnává. K výraznějšímu namáhání dochází, nepůsobí-li obě zatížení současně. Zpravidla při montáži, servisu nebo údržbě těchto zařízení. Např. je-li nádrž vypuštěna, působením pouze obsypu může docházet k nežádoucím deformacím, nebo napětí nad dovolenou mez materiálu. Nevyrovnané krátkodobé zatížení v řádu několika hodin nežádoucně přispívá k tečení materiálu, klesáním modulu a tím zvyšujícím se riziku zborcení celé konstrukce.

Nádrže se zpravidla vyztužují prstenci, žebry zvyšující jak tuhost, tak odolnost vůči ztrátě stability. Pro názornost je uveden model ČOV.

8.1 Geometrie modelu konstrukce



Obr. č.: 58: Geometrie modelu ČOV

8.2 Provozní podmínky:

Konstrukce je kontrolována na tyto provozní podmínky:

Medium – znečištěná voda, hustota 1000 kg/m³

Střední teplota konstrukce : max 20 °C

Projektovaná životnost zařízení : 25 let

Materiál zásypu nádrže: hustota 18 kN/ m³ , podle EN 12566

8.3 Materiálové parametry konstrukce

Časově závislé materiálové parametry (pro 25 let) brány podle EN 1778, PP - H.

Výpočtové hodnoty mezních napětí a modulů tečení materiálu :

Modul tečení polypropylenu PP-B pro krátkodobé intervaly vychází ze zkoušky tečení tříbodového ohybu při středním napětí 5MPa pro čas 10 hodin od počátku zatížení.

pro krátkodobé zatížení - cca 10 h $K = 18 \text{ MPa}$, $E = 1000 \text{ MPa}$

pro dlouhodobé zatížení - 25 let, $K = 11 \text{ MPa}$, $E = 330 \text{ MPa}$, pro střední hodnotu namáhání konstrukce cca 1 MPa.

Poissonův poměr je uvažován (nezávisle na době zatížení) hodnotou $\nu = 0,35$

Redukční součinitele dle ČSN EN 1778 :

korekční faktor na vliv provozovaného media (znečištěná voda) $A_{2K} = 1,0$

korekční faktor zohledňující vliv teploty na rázovou pevnost $A_1 = 1,3$

Dlouhodobý koeficient svaru : $f = 0,6$

Krátkodobý koeficient svaru : $f = 0,8$,

pro způsob svařování : topným tělesem, extruderem

Dovolená výpočtová namáhání pro kontrolu pevnosti podle EN 1778

$$\sigma_{\text{DOV}} = K \cdot f / A_1 \cdot A_{2K} \cdot S$$

pro případ zatížení LC1 - kontrola těsnosti :

koeficient bezpečnosti $S = 2$

$$\sigma_{\text{DOV}} = K f / A_1 A_{2K} S = 18 \cdot 0,8 / 1,3 \cdot 1,0 \cdot 2 = \mathbf{5,5 \text{ MPa}}$$

pro provozní případy zatížení LC2, LC3

koeficient bezpečnosti $S = 2$, EN 1778,

$$\sigma_{\text{DOV}} = K f / A_1 A_{2K} S = 11 \cdot 0,6 / 1,3 \cdot 1,0 \cdot 2 = \mathbf{2,55 \text{ MPa}}$$

8.4 Výpočet

8.4.1 Kontrola na pevnost

Konstrukce je řešena pomocí programového FEM systému Cosmos/M. Řešení je provedeno jako lineárně elastická analýza napětí a deformace skořepinového modelu.

Podmínka spolehlivosti vyžaduje, aby výpočtem určené namáhání, vyjádřené hodnotou srovnávacího von Misesova napětí nepřekročilo dovolenou mez, určenou na základě dlouhodobě sledovaných dat ze standardních zkoušek dle EN 1778.

Uvažované stavy zatížení konstrukce:

Zatížení jsou uvažována v hodnotách dle EN 12 566-3

LC 1 : Mimořádný krátkodobý stav zatížení - zkouška těsnosti - zatížení hydrostatickým tlakem zcela naplněné neobsypané nádrže.

max. hodnota hydrostat. tlaku - dno nádrže:

$$p_H = H \rho g = 2,4 \text{ m} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 24\,000 \text{ Pa} = 0,024 \text{ MPa}$$

Hydrostatický tlak je lineárně rozložen po výšce nádrže.

LC 2 : Mimořádný krátkodobý stav zatížení – zcela vyprázdňená čistírna pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádrže.

- max. hodnota horizontálního tlaku obsypu $p_z = k H \gamma g$

- výpočtová výška $H = 2,4 \text{ m}$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, koeficient $k = 0,27$ pro materiál zásypu šterk dle EN 12 566-3.

$$p_z = 0,27 \cdot 2,4 \text{ m} \cdot 1800 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 11660 \text{ Pa} = 0,01166 \text{ MPa} .$$

Po výšce nádoby je uvažováno lineární rozložení tlaku s nulovou hodnotou v úrovni terénu.

LC3 : Provozní zatížení – kombinace hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu

max. hodnota hydrostat. tlaku - dno nádrže:

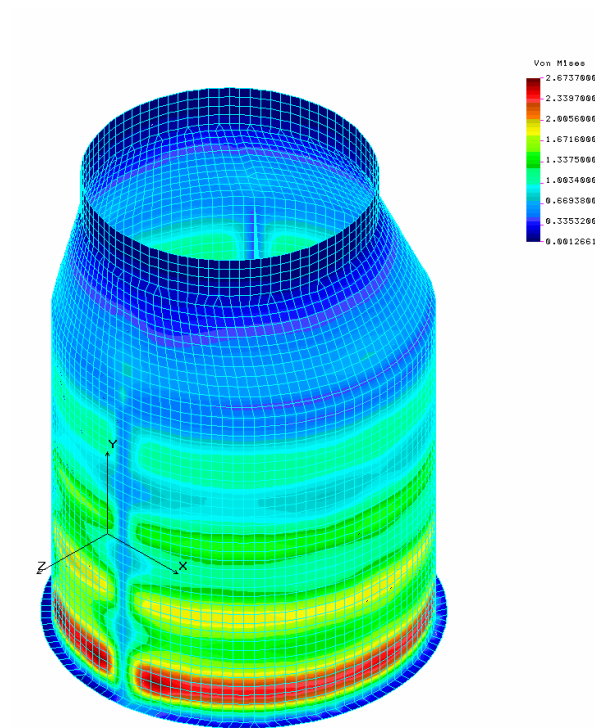
$$p_H = H \rho g = 1,7 \text{ m} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 17 000 \text{ Pa} = 0,017 \text{ MPa}$$

Hydrostatický tlak je lineárně rozložen po výšce nádrže.

Výsledné hodnoty max. namáhání pláště čistírny**LC 1 :**

Maximální hodnota von Misesova napětí : $\sigma_{\text{MAX}} = 2,67 \text{ MPa}$

Podmínka spolehlivosti: $\sigma_{\text{MAX}} < \sigma_{\text{DOV}} \quad 2,67 < 5,5 \text{ MPa} - \text{vyhovuje}$

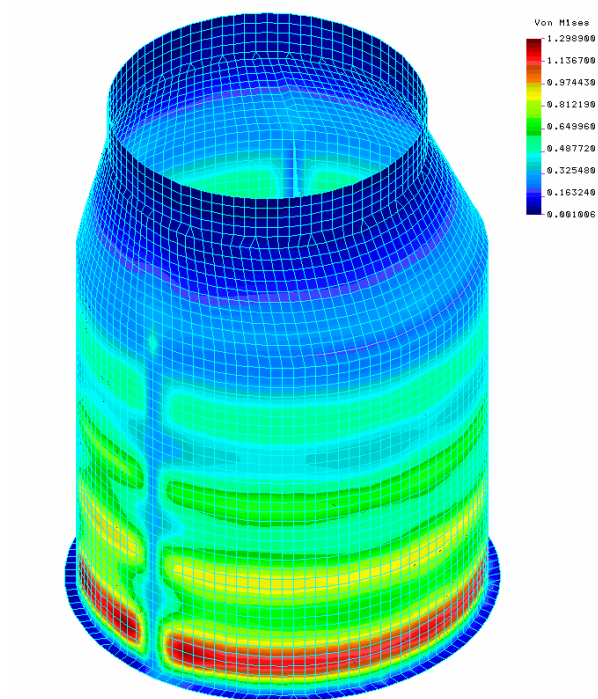


Obr. č.: 59 Průběh Von Misesova napětí při zatížení LC1

LC 2 :

Vypočtená maximální hodnota von Misesova napětí : $\sigma_{\text{MAX}} = 1,29 \text{ MPa}$,

Podmínka spolehlivosti: $\sigma_{\text{MAX}} < \sigma_{\text{DOV}} \quad 1,29 < 2,55 \text{ MPa} - \text{vyhovuje}$

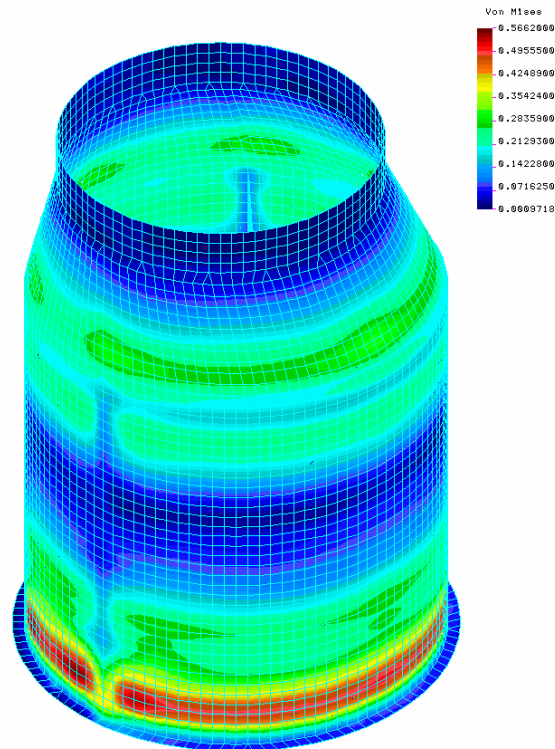


Obr. č.: 60 Průběh Von Misesova napětí při zatížení LC2

LC 3 :

Vypočtená maximální hodnota von Misesova napětí $\sigma_{\text{MAX}} = 0,57 \text{ MPa}$,

Podmínka spolehlivosti: $\sigma_{\text{MAX}} < \sigma_{\text{DOV}} : 0,57 < 2,55 \text{ MPa}$ - vyhovuje



Obr. č.: 61 Průběh Von Misesova napětí při zatížení LC3

8.4.2 Kontrola na stabilitu

Konstrukce je řešena pomocí programového FEM systému Cosmos/M. Řešení je provedeno jako lineárně elastická modální analýza skořepinového modelu. Podmínka spolehlivosti vyžaduje, aby výpočtové zatížení konstrukce v uvažovaných případech zatížení s požadovanou bezpečností nepřekročilo výpočtem určené zatížení na mezi ztráty kvazielastické stability pláště konstrukce.

LC2

Vypočtené vlastní hodnoty :

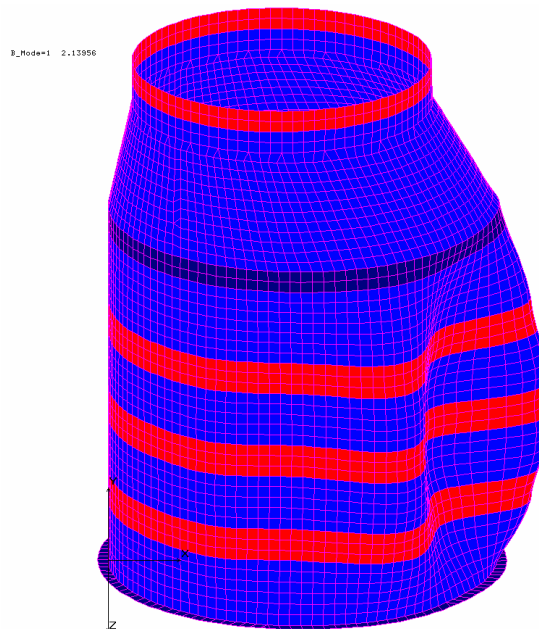
Vlastní hodnoty představují mezní zatížení jako násobek provozního zatížení a jsou tak hodnotou bezpečnosti na mezní stav ztráty stability konstrukce. Směrodatná je nejmenší kladná hodnota. Výpočtem určené vlastní hodnoty pro výpočtový modul $E = 1000 \text{ MPa}$

1 **0.2139561E+01**

2 0.2233348E+01

3 0.2674226E+01

Podmínka spolehlivosti: **2,14 > 2** **vyhovuje**



Obr. č.: 62 Kontrola stability při zatížení LC2

Konstrukce ČOV vyhovuje z hlediska pevnosti pro případy zatížení LC1, LC2 a LC3. Pro případ zatížení LC2 je splněna podmínka stability.

Dovolená namáhání vychází z materiálových charakteristik PP-H uvedených v normě EN 1778. Hodnoty jsou sníženy redukčními součiniteli koeficientu svaru, korekčního faktoru působení media, korekční faktor vlivu teploty na rázovou pevnost a koeficient bezpečnosti $S=2$. Modul tečení pro krátkodobé stavy vychází z provedeného měření ohybovými zkouškami PP-H. Hodnoty modulu tečení pro dlouhodobé zatížení vychází z EN 1778.

V případě zatížení LC1 působí krátkodobě hydrostatický tlak media uvnitř nádoby. Maximální hodnota Von Misesova napětí je 2,67 MPa. Toto špičkové napětí vzniká ve spodní části válcové plochy ČOV. Maximální dovolené napětí pro případ zatížení LC1 je 5,5 MPa. Podmínka spolehlivosti je splněna.

Při zatížení LC2 na nádobu krátkodobě působí pouze hydrostatický tlak obsypu, nádrž je prázdná. Maximální hodnota Von Misesova napětí je 1,29 MPa. Dovolené napětí pro tento případ je 2,55 MPa. Podmínka spolehlivosti je splněna.

Zatížení LC3 je kombinací předchozích zatížení LC1 a LC2, kdy se do určité míry vyrovnává tlak obsypu a tlak media uvnitř ČOV. Jedná se o provozní stav nádrže, tzn. působení je dlouhodobé. Maximální hodnota Von misesova napětí činí $0,57 \text{ MPa} < 2,55 \text{ MPa}$. podmínka spolehlivosti je splněna .

Pro případ LC2 byla provedena kontrola na stabilitní jevy boulení. Podmínka spolehlivosti $2,14 > 2$ je splněna.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo objasnit problematiku tečení polymerních materiálů při mechanickém zatížení. Většina dostupných pramenů se zaměřuje na změny v mechanickém chování polymerních materiálů z dlouhodobého hlediska. Účelem experimentu bylo zaměřit se na mechanické chování pro krátkodobé časy v řádu několika hodin. Byl sledován pokles modulu tečení při konstantním ohybovém zatížení. Modul tečení byl měřen na základě ohybových zkoušek, které byly prováděny tříbodovým a pro srovnání i čtyřbodovým ohybem. Měření jsme prováděli pro 3, 4 a 5 MPa střední hodnoty ohybového napětí u tříbodového ohybu. Pro čtyřbodový ohyb 3, 4 a 5 MPa jmenovitého ohyb. napětí mezi podporami. Modul tečení byl pro kontrolu srovnán s hodnotami zjištěnými při ohybové zkoušce na trhacím stroji. Čtyřbodové zatížení vykazuje poněkud vyšší hodnoty modulu tečení. Tato imperfekce vznikla pravděpodobně vlivem rozdílného průběhu ohyb. momentu a příčných sil po délce zkušebního tělíska při tříbodovém a čtyřbodovém ohybu.

Naměřené výsledky lze aplikovat při dimenzování jímek, ČOV, bazénů apod. při krátkodobých stavech, kdy je nádoba zatížena například pouze vnitřním nebo vnějším přetlakem. K těmto mezním stavům dochází například při montáži nebo údržbě jímek, bazénů, ČOV apod. Za normálního provozu se působení hydrostatického tlaku media a tlaku obsypu nádrže vyrovnávají.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Šuba O., Mechanické chování těles, 3. vyd., Zlín :UTB, 2006. 96 s.,
ISBN 80-7318-484-2
- [2] Šuba O., Mechanické a termomechanické chování tenkostěnných plošných výrobků z plastů, Stabilita desek a skořepin, UTB, Zlín, 2008.
- [3] Volek F., Základy pevnosti a pružnosti, 2. vyd., Zlín: UTB, 2006. 156 s.,
ISBN 80-7318-440-0
- [4] Holzmüller W., Altenburg K.: Fyzika polymerů, 1. vyd., Praha: SNTL, 1966. 628 s.
- [5] Hugo J. a kol., Konstrukční plastické hmoty, 1. vyd., Praha : SNTL, 1965. 525 s.
- [6] Hausnerová B., Pavlínek V., Fyzika polymerů laboratorní cvičení, 1.vyd.,
Zlín :UTB, 2003. 84 s. ISBN 8073181576
- [7] Štěpek J., Zpracování plastů, 1. vyd. Praha :SNTL, 1980, 220 s.
- [8] Meissner B., Zilvar V., Fyzika polymerů, 1.vyd., Praha:SNTL, 1987, 306 s.
- [9] Schatz M., Vondráček P., Zkoušení polymerů, Praha: VŠCHT, 1979, 264 s.
- [10] Rybníkář F. a kol., Analýza a zkoušení plastických hmot, 1. vyd., Praha: SNTL,
1965, 418 s.
- [11] Roy T., Analýza plastů, 1. vyd. Praha:SNTL, 1989, 734 s.
- [12] Mark J. a kol., Physical Properties of Polymers, Cambridge University Press,
2004, ISBN 0-521-53018-0
- [13] Mleziva J., Polymery (výroba, struktura, vlastnosti a použití), Sobotáles, Praha,
1993, ISBN 80-90-1570-41
- [14] Zámorský Z., Nauka o polymerech, Brno: VUT, 1982, 121 s.
- [15] ČSN EN 1778 Charakteristické hodnoty pro svařované konstrukce z termoplastů
- Stanovení dovoleného namáhání a modulů pro navrhování svařovaných dílů
z termoplastů, Praha: ČNI, 2004, 55s.
- [16] ČSN ISO 899-1 Stanovení krípkového chování, ČNI, 2004, Praha, 20 s.

- [17] ČSN EN ISO 527 Stanovení tahových vlastností, ČNI, 1997, Praha, 14 s.
- [18] www.img-management.cz
- [19] www.unipetrolrpa.cz
- [20] www.lpm.cz
- [21] www.slovnaft.sk

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ε	Creepová deformace
σ	Tahové/tlakové napětí
η_t	Smyková viskozita
γ	Rychlost smykové deformace
η	Elongační viskozita
Q	Aktivační energie
L_t	Délka vzorku v čase t
A	Plocha průřezu
E_t	Modul tečení v ohybu
W _o	Průřezový modul v ohybu
J _z	Kvadratický moment průřezu
y	Průhyb působením síly F
y_p	Průhyb působením síly F _c
M _o	Ohybový moment
M _{oc}	Ohybový moment vyvolaný silou F _c
F	Síla zatížení
F _c	Síla pružiny úchylkoměru
ν	Poissonův poměr
ρ	Hustota kapaliny
γ	Hustota zeminy
K	Mezní napětí - časově a teplotně závislá mez pevnosti
f	Svarový součinitel
S	Koeficient bezpečnosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. č.: 1 3D model molekuly Polypropylenu</i>	13
<i>Obr. č.: 2 Difúze atomů v krystalu.....</i>	22
<i>Obr. č.: 3 Tvar zkušebního tělíska</i>	23
<i>Obr. č.: 4 Tahová zkouška na trhacím stroji</i>	25
<i>Obr. č.: 5 Křivky poměrného prodloužení v tahu na čase při různých teplotách.....</i>	27
<i>Obr. č.: 6 Křivky modulu tečení v závislosti na čase</i>	27
<i>Obr. č.: 7 Izochronní křivka napětí-poměrné prodloužení.....</i>	28
<i>Obr. č.: 8 Schema tříbodového ohybu.....</i>	29
<i>Obr. č.: 9 Křivky provozní životnosti pro trubky z PP-H</i>	32
<i>Obr. č.: 10 Modul tečení PP-H při různých napětí za 1 rok</i>	33
<i>Obr. č.: 11 Element zakřiveného prutu zatíženého ohybem</i>	35
<i>Obr. č.: 12 Zobrazení jednotlivých typů vnějších zatížení prutu</i>	35
<i>Obr. č.: 13 Schema principu metody řezu</i>	36
<i>Obr. č.: 14: Průběh ohyb. momentu a příčných sil tříbod. ohybu.....</i>	36
<i>Obr. č.: 15: Průběh ohyb. momentu a příčných sil čtyřbod.. ohybu.....</i>	37
<i>Obr. č.: 16: Ztráta stability jednoose tlačené desky s rovnými okraji</i>	38
<i>Obr. č.: 17 Ztráta stability válcové skořepiny vnějším přetlakem</i>	39
<i>Obr. č.: 18: Praktický případ ztráty stability ČOV vyztužené prstenci.....</i>	39
<i>Obr. č.: 19 Zkušební přípravek.....</i>	42
<i>Obr. č.20: Úchylkoměr Mitutoyo 543 681B, technické údaje</i>	44
<i>Obr. č.: 21 Webová kamera Genius Eye 312.....</i>	45
<i>Obr. č.: 22 Uživatelské prostředí softwareu Webcam Capture</i>	45
<i>Obr. č.: 23 Měření deformace 3 bodového ohybu</i>	47
<i>Obr. č.: 24: Schéma 3 bodového ohybu</i>	48
<i>Obr. č.: 25 Numerická kontrola metod pomocí FEM software</i>	49
<i>Obr. č.: 26 Průběh tuhosti pružiny úchylkoměru.....</i>	49
<i>Obr. č.: 27 Měření deformace čtyřbodového ohybu</i>	50
<i>Obr. č.: 28 Schéma 4 bodového ohybu.....</i>	51
<i>Obr. č.: 29 Numerická kontrola čtyřbodového ohybu pomocí FEM software.</i>	51
<i>Obr. č.: 30 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 3MPa, PP-B</i>	54
<i>Obr. č.: 31 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 3MPa, PP-B</i>	54

<i>Obr. č.: 32 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 4 MPa, PP-B</i>	<i>55</i>
<i>Obr. č.: 33 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 4MPa, PP-B</i>	<i>55</i>
<i>Obr. č.: 34 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 5MPa, PP-B</i>	<i>56</i>
<i>Obr. č.: 35 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 5MPa, PP-B</i>	<i>56</i>
<i>Obr. č.: 36 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 3MPa, PP-H.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. č.: 37 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 3MPa, PP-H.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. č.: 38 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 4MPa, PP-H.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. č.: 39 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 4MPa, PP-H.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. č.: 40 Průběh deformace nosníku při ohyb napětí 5MPa, PP-H.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. č.: 41 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 5MPa, PP-H.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. č.: 42 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 3MPa, PP-B</i>	<i>60</i>
<i>Obr. č.: 43 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 3MPa, PP-B</i>	<i>60</i>
<i>Obr. č.: 44 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 4MPa, PP-B</i>	<i>61</i>
<i>Obr. č.: 45 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 4MPa PP-B</i>	<i>61</i>
<i>Obr. č.: 46 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 5MPa, PP-B</i>	<i>62</i>
<i>Obr. č.: 47 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 5MPa, PP-B</i>	<i>62</i>
<i>Obr. č.: 48 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 3MPa, PP-H.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. č.: 49 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 3MPa, PP-H.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. č.: 50 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 4MPa, PP-H.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. č.: 51 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 4MPa, PP-H.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. č.: 52 Průběh deformace nosníku při ohyb. napětí 5MPa, PP-H.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. č.: 53 Průběh modulu tečení na čase pro ohyb. napětí 5MPa, PP-H.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. č.: 54: Srovnání modulů tečení PP-B při 3 bodovém ohybu pro ohyb. napětí 3, 4 a 5 MPa při konstantní vzdálenosti podpor.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. č.: 55: Srovnání modulů tečení PP-H při 3 bodovém ohybu pro ohyb. napětí 3, 4 a 5 MPa při konstantní vzdálenosti podpor.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. č.: 56: Srovnání modulů tečení PP-B při 4 bodovém ohybu pro ohyb. napětí 3, 4 a 5 MPa.</i>	<i>68</i>
<i>Obr. č.: 57: Srovnání modulů tečení PP-H při 4 bodovém ohybu pro ohyb. napětí 3, 4 a 5 MPa.</i>	<i>69</i>
<i>Obr. č.: 58: Geometrie modelu ČOV</i>	<i>70</i>
<i>Obr. č.: 59 Průběh Von Misesova napětí při zatížení LCI</i>	<i>74</i>

<i>Obr. č.: 60 Průběh Von Misesova napětí při zatížení LC2</i>	<i>75</i>
<i>Obr. č.: 61 Průběh Von Misesova napětí při zatížení LC3</i>	<i>76</i>
<i>Obr. č.: 62 Kontrola stability při zatížení LC2.....</i>	<i>77</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Výpočetní tabulka pro tříbodový ohyb</i>	46
<i>Tab. 2: Výpočetní tabulka pro čtyřbodový ohyb</i>	47
<i>Tab. 3: Modul pružnosti v tahu stanoven pomocí trhacího stroje</i>	52
<i>Tab. 4: Modul pružnosti v ohybu zjištěný na trhacím stroji</i>	53
<i>Tab. 5 Parametry měření</i>	54
<i>Tab. 6 Parametry měření</i>	55
<i>Tab. 7 Parametry měření</i>	56
<i>Tab. 8 Parametry měření</i>	57
<i>Tab. 9 Parametry měření</i>	58
<i>Tab. 10 Parametry měření</i>	59
<i>Tab. 11 Parametry měření</i>	60
<i>Tab. 12 Parametry měření</i>	61
<i>Tab. 13 Parametry měření</i>	62
<i>Tab. 14 Parametry měření</i>	63
<i>Tab. 15 Parametry měření</i>	64
<i>Tab. 16 Parametry měření</i>	65

